

**ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS COMO
MÉTODO DE INTERVENCIÓN EN TUBERÍAS DE TRANSPORTE DE
HIDROCARBUROS**

Presentado por

Abraham Sánchez Elguedo

Trabajo de investigación entregado como requerimiento parcial para obtener el
título de Magíster en Ingeniería Mecánica

Director

Ing. Humberto Gómez Vega PhD.

Departamento de Ingeniería Mecánica

Universidad del Norte

Barranquilla, Colombia

2018

AGRADECIMIENTOS

¡A Dios por permitirme vivir esta enriquecedora experiencia de crecimiento personal y profesional!

En especial al ingeniero Humberto Arturo Gómez Vega por la confianza brindada, así como por su constante dedicación, apoyo y orientación durante el desarrollo de esta investigación y el curso de mis estudios de postgrado.

Al Centro Integrado de Materiales y Manufactura (CIMM) de la Universidad del Norte, en especial a la ingeniera Jessica Rodriguez y a los asistentes de laboratorios Luis Ruiz Florez y Adolfo Pérez Sánchez por el apoyo recibido y estar siempre dispuestos a colaborar durante el desarrollo del presente trabajo.

A la empresa CPS services, en especial a la ingeniera Liliana Paez y al ingeniero Nicolás Arévalo por su colaboración en la adquisición inicial de materiales, además de la disposición a la resolución de preguntas sobre el uso de sus productos.

A la empresa PROMIGAS SA ESP por suministrar los medios para el desarrollo de esta tesis. Esta tesis de maestría fue financiada a través del proyecto Universidad-Empresa titulado “Evaluación y desarrollo de métodos de rehabilitación para tuberías de transporte de gas”.

Al ingeniero José David Pérez Ruiz por su colaboración en la fabricación de los accesorios de radiación térmica, y su disposición al apoyo de la presente tesis de maestría.

1. TABLA DE CONTENIDO

2.	LISTA DE FIGURAS.....	6
3.	LISTA DE TABLAS.....	7
4.	INTRODUCCION.....	8
	4.1. CONTEXTO GENERAL DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN.....	7
	4.2. ESTADO ACTUAL DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN.....	9
	4.2.1. PUBLICACIONES Y DESARROLLOS TEÓRICOS.....	9
	4.2.2. EVOLUCIÓN DE MÉTODOS DE REPARACIÓN/REHABILITACIÓN DE TUBERÍAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS.....	10
5.	MOTIVACIÓN EXPERIMENTAL.....	15
6.	OBJETIVOS.....	20
	GENERAL.....	19
	ESPECÍFICOS.....	19
7.	MARCO TEORICO.....	21
	7.1. CLASIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE MÉTODOS DE REPARACIÓN/REHABILITACIÓN.....	20
	7.2. DESPERFECTOS.....	21
	7.3. TÉCNICAS DE INTERVENCIÓN.....	23
	7.3.1. RECTIFICADO (LIMADO).....	24
	7.3.2. MANGA DE REFUERZO DE CIERRE COMPLETO.....	25
	7.3.3. ABRAZADERAS MECÁNICAS.....	28
	7.3.4. MATERIALES COMPUESTOS.....	30
	7.3.5. DEPOSICIÓN POR SOLDADURA.....	31
	7.3.6. PARCHES.....	32
	7.3.7. BYPASS EN CALIENTE.....	32
	7.4. NORMAS EN LA INDUSTRIA DEL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS.....	33
	7.5. VERIFICACIÓN DE PROCESO DE REPARACIÓN/REHABILITACIÓN.....	36
	7.6. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN.....	39
	7.6.1. ASTM D3039 PROPIEDADES DE TRACCIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA.....	41

8.	SELECCIÓN DE METODOLOGÍA DE REPARACIÓN/REHABILITACIÓN	45
9.	EXPERIMENTACIÓN	49
	9.1. MÉTODO EXPERIMENTAL.....	48
	9.2. REACTIVOS, MATERIALES Y EQUIPOS.....	49
10.	FABRICACIÓN	58
	10.1. SELECCIÓN DE PARAMETROS EXPERIMENTALES.....	57
	10.1.1. RESISTENCIA DE LA RESINA.....	58
	10.1.2. TEMPERATURA DE OPERACIÓN.....	59
	10.1.3. DISTRIBUCIÓN UNIFORME DE LA MATRIZ SOBRE LAS FIBRAS.....	60
	10.1.4. TIPO DE FIBRA IMPLEMENTADA.....	61
	10.1.5. ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS.....	61
	10.1.6. NÚMERO DE CAPAS.....	62
	10.2. PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN.....	63
11.	CARACTERIZACIÓN	71
	11.1. ENSAYO DE TENSIÓN.....	70
12.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	72
	12.1. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE VARIANZA.....	71
	12.1.1. VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS.....	72
	12.1.2. DEFINICIÓN DE NIVELES ÓPTIMOS DE RESISTENCIA.....	75
	12.2. SENSIBILIDAD TÉRMICA DEL CUMPUERTO DE ARAMIDA.....	76
	12.3. MODELOS EXPERIMENTALES.....	77
	12.3.1. MODELO DE FIBRA DE VIDRIO.....	79
	12.3.2. MODELO DE FIBRA DE CARBONO.....	80
	12.3.3. MODELO DE FIBRA DE ARAMIDA.....	81
	12.4. MODOS DE FALLA.....	82
	12.5. APLICABILIDAD DE LA SOLUCIÓN COMPUESTA.....	93
13.	CONCLUSIONES	96
14.	TRABAJOS FUTUROS.....	99

15.	BIBLIOGRAFÍA.....	101
-----	-------------------	-----

2. LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Publicaciones indexadas sobre materiales compuestos como mecanismo de reparación/rehabilitación. Información recopilada de www.webofknowledge.com .	10
Figura 2. Línea de tiempo de evolución de sistemas de reparación/rehabilitación de tuberías de transporte de hidrocarburos.	14
Figura 3. A) Representación de manga tipo A. b) Representación de manga tipo B.	27
Figura 4. Soldadura a tope aceptable en mangas tipo B. (A) Sin placa de respaldo; (B) Con placa de respaldo y ranura; (C) Con placa de respaldo sin ranura.	28
Figura 5. Diagrama de reparación/rehabilitación con abrazadera.	30
Figura 6. Diagrama de probetas de estallido para pruebas hidrostáticas.	38
Figura 7. Modos de falla típicos y su codificación de acuerdo a la ASTM D3039. Tomado de [87].	44
Figura 8. Valoración mediante método AHP.	48
Figura 9. Diagrama de factores que afectan la capacidad mecánica de los materiales compuestos.	58
Figura 10. Recipientes de mezclado.	65
Figura 11. Taladro con accesorio de mezcla de mortero.	66
Figura 12. Aplicación de mezcla resina-catalizador sobre secciones de fibra.	66
Figura 13. Rodillo de mortero con canales para homogeneización de vertido de mezcla resina-catalizados, y extracción de burbujas.	67
Figura 14. Distribución y marcación de probetas de tensión según orientación y tipo de material.	67
Figura 15. Probetas de tensión.	69
Figura 16. Probetas de segunda fase experimental.	69
Figura 17. Esquema de proceso experimental.	70
Figura 18. Montaje de pruebas de tensión.	71
Figura 19. Gráfico de probabilidad normal de los residuos.	74
Figura 20. Gráfico de homocedasticidad de factor orientación.	74
Figura 21. Gráfico de homocedasticidad de factor tipo de fibra.	75
Figura 22. Verificación de independencia de los residuales del experimento.	75
Figura 23. Gráfico de interacciones de factores experimentales.	77
Figura 24. Comportamiento mecánico de la fibra de aramida ante variación de temperatura.	78
Figura 25. Gráfico de correlaciones entre factores de entrada y salida.	79
Figura 26. Diagrama de resistencias de fibras de material compuesto.	80

3. LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Métodos recomendados para evaluar la resistencia al estallido. Adaptado de [78].	36
Tabla 2. Revisión de literatura de defectos tipo A maquinados sobre probetas de tubería.	40
Tabla 3. Normas ASTM para la caracterización de materiales compuestos.	42
Tabla 4. Geometría recomendada de probetas de tensión. Adaptado de [87].	43
Tabla 5. Revisión de los métodos de reparación/rehabilitación. *: Posibilidad de convertirse en solución permanente mediante acciones adicionales. +++: No aplica.	46
Tabla 6. Evaluación de alternativas. +++: No aplica.	47
Tabla 7. Lista de reactivos implementados.	50
Tabla 8. Lista de equipos utilizados.	54
Tabla 9. Lista de materiales implementados en la experimentación.	57
Tabla 10. Propiedades mecánicas típicas de resinas termoestables. Adaptado de [88].	59
Tabla 11. Orden y proporciones de fabricación de mezcla resina-catalizador.	65
Tabla 12. Orden de ejecución experimental.	68
Tabla 13. Convención entre variables de estudio naturales vs codificadas.	72
Tabla 14. Resultados experimentales en variable codificada.	73
Tabla 15. ANOVA resultante de primera fase de experimentación.	73
Tabla 16. Prueba de diferencia mínima significativa LSD con factores codificados.	76
Tabla 17. ANOVA del modelo de regresión propuesto para la fibra de vidrio.	81
Tabla 18. Validación de coeficientes del modelo.	81
Tabla 19. ANOVA del modelo de regresión propuesto para la fibra de carbono.	81
Tabla 20. Validación de coeficientes del modelo.	82
Tabla 21. ANOVA del modelo de regresión propuesto para la fibra de aramida.	82
Tabla 22. Validación de coeficientes del modelo.	82

4. INTRODUCCION

4.1. CONTEXTO GENERAL DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN

Los hidrocarburos suelen ser transportados a través tubería metálica, debido a la practicidad y poca reactividad que este material representa respecto al fluido transportado. Las tuberías de transporte de fluidos inflamables están sujetas a condiciones de operación que generan su continuo deterioro. Estas circunstancias vienen como resultado de acciones internas tales como la variabilidad en el flujo transportado (cambios de presión interna) y/o la agresividad química del fluido transportado contra el sustrato. A su vez, eventos externos como las interacciones de humanos, maquinaria y naturaleza, que comprometen la integridad de la tubería. Todas estas interacciones pueden causar desperfectos en la tubería y en todos los elementos del sistema.

El impacto del deterioro de un sistema de tuberías depende de factores como el tamaño, la complejidad, la topografía y las condiciones del servicio. Es casi imposible predecir el momento del colapso de una tubería, sin embargo, es posible estimar si una tubería tiene una condición de deterioro que pueda generar un posible colapso, por lo que es necesario, de acuerdo con estándares y códigos internacionales, la ejecución de intervenciones para remediar esta situación. Además, debido a los altos y potenciales costos que resultan de una falla en los ductos (pérdida de vidas, daños a personas o propiedades, penalizaciones por interrupción del servicio, limpieza medio ambiental y penalizaciones por contaminación) [1]; es de vital importancia el desarrollar y tener técnicas de intervención que garanticen la integridad de estas instalaciones a lo largo del tiempo de una manera rentable.

Las intervenciones tienen diferentes ámbitos que dependen de la disponibilidad, la urgencia y su efecto en el servicio. Estos están definidos por Griggs et al. [2] como reparaciones, rehabilitaciones y reemplazos. Las reparaciones son intervenciones que tienen como objetivo proporcionar la restauración parcial o total de la capacidad operativa de la tubería en puntos específicos debido a la presencia de desperfectos (fugas, roturas, abolladuras, etc.). El objetivo principal de estas es proporcionar una solución temporal y el restablecimiento de la operación de transporte lo antes posible. Las rehabilitaciones por su parte son intervenciones planeadas que buscan fortalecer y restaurar la tubería a una condición similar o superior a la capacidad original de la misma. Su objetivo principal es restablecer o aumentar los factores de seguridad iniciales del material del sustrato, al reducir las tensiones o esfuerzos residuales en la tubería. Teniendo en cuenta que la vida esperada de una tubería de transporte de hidrocarburos es de 30 años, la rehabilitación debería conducir a una extensión significativa de la vida operativa. De

acuerdo con la literatura, esta extensión debe ser de al menos $2/3$ de la vida inicial, es decir, 20 años, por lo que puede ser una alternativa atractiva a la sustitución, Mannesmann et al. [3]. Finalmente, los reemplazos son intervenciones realizadas para instalar un nuevo componente de tubería en la zona afectada. Los métodos convencionales para la reparación de tuberías de transporte, como lo son los reemplazos, sugieren un previo drenaje total del fluido transportado, para luego ser intervenidas y reparadas en sus tramos con daños. Esto eleva los costos debido a lo que refiere la suspensión del servicio. El enfoque de reparación en servicio toma gran importancia por la viabilidad y economía de este. Tal enfoque disminuye la escasez de suministro de hidrocarburos, los gastos de reposición de tuberías, evita liberación de fluido al medio ambiente, así como pérdidas del mismo, etc. El costo de una reparación sin interrumpir el servicio, puede ser de hasta 20-25 veces menor que el método tradicional de suspensión y cambio de sección comprometida [4].

Por lo tanto, la selección de un método eficaz y eficiente de reparación/rehabilitación requiere una evaluación crítica y comparativa respecto a múltiples variables como lo son su efectividad en presencia de ciertos desperfectos, criterios del operador, aplicabilidad descrita por las normas, entre otros.

En la presente tesis, se estudiará el comportamiento mecánico de los materiales compuestos como posible opción de reparación/rehabilitación de sistemas de transporte de hidrocarburos. Para ello se realizará una revisión del estado del arte de las diferentes técnicas implementadas en la industria, se caracterizarán cada una de ellas y se demuestra, mediante una metodología AHP (Analytical herarchical process) la pertinencia de la implementación de los materiales compuestos. A partir de lo anterior se indaga sobre el desarrollo de modelos matemáticos y/o experimentales que describan el comportamiento mecánico de este tipo de materiales. Finalmente, se realiza un Diseño experimental que permita determinar un modelo experimental descriptivo que relacione la orientación de la fibra y el tipo de fibra utilizada, con el comportamiento a tensión del material compuesto. Se realiza una prueba de sensibilidad para así determinar el efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas del material.

4.2. ESTADO ACTUAL DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN

4.2.1. PUBLICACIONES Y DESARROLLOS TEÓRICOS

La investigación y publicaciones relacionadas al desarrollo de métodos de reparación/rehabilitación que implementen materiales compuestos ha venido en aumento desde las últimas dos décadas. De acuerdo con la base de datos de publicaciones indexadas, “*web of science*”, la tasa de aumento es progresiva como se muestra en la **Figura 1**:

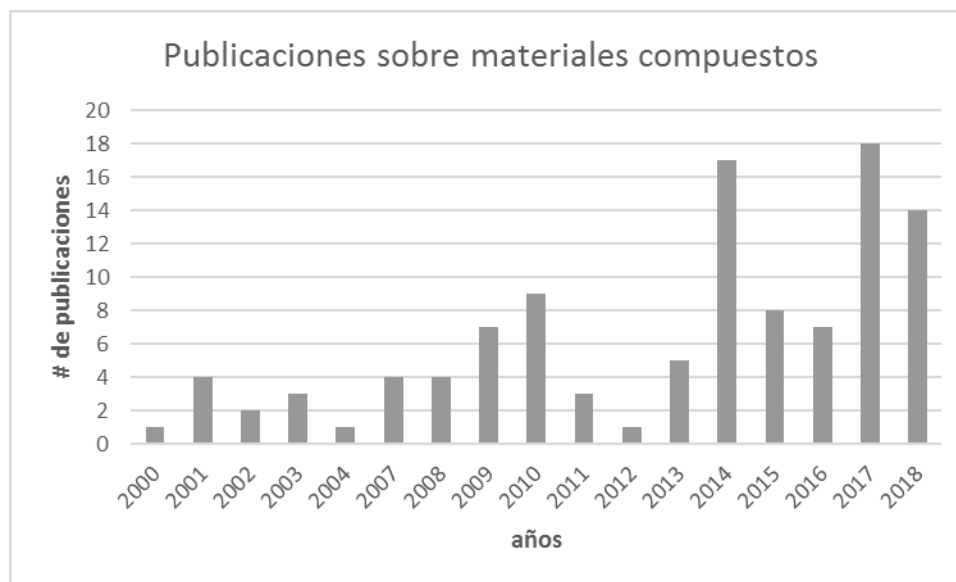


Figura 1. Publicaciones indexadas sobre materiales compuestos como mecanismo de reparación/rehabilitación.

Información recopilada de www.webofknowledge.com.

El mayor número de publicaciones se orienta a la reparación de sistemas de tubería de transporte de fluidos inflamables, usualmente implementados en la industria Oil & Gas. A su vez, este tipo de tecnología es ampliamente utilizado en el sector civil en la reparación y reestructuración de estructuras de concreto.

De acuerdo con Toutanji et al. [5], la aramida y la fibra de carbono aumentan la resistencia de sistema de reparación y por tanto, la de la tubería, además de la durabilidad y las propiedades anticorrosivas de la misma. Por otro lado, el uso de telas de vidrio ayuda a mejorar la resistencia de la envoltura. Los materiales de vidrio son resistentes a la corrosión, la humedad y los medios hostiles.

4.2.2. EVOLUCIÓN DE MÉTODOS DE REPARACIÓN/REHABILITACIÓN DE TUBERÍAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS

El análisis evolutivo de las soluciones implementadas en las tuberías de transporte de hidrocarburos se basó en una revisión de las patentes desarrolladas para la reparación/rehabilitación de estos activos. Esta revisión se centra en intervenciones que requieren excavación. Aquellas patentes que no requieran realizar zanjas o socavado no se encuentran contempladas dentro del estudio, debido a su correspondiente necesidad de interrumpir el servicio para su implementación. De manera general, las patentes desarrolladas se han orientado a la implementación de fundas extraíbles capaces de contener fugas y proporcionar soporte estructural a la infraestructura de transporte de hidrocarburos.

Las primeras invenciones sobre métodos de intervención de tuberías de transporte de hidrocarburos datan de periodos anteriores a la década de 1970. En dicho periodo, fueron creadas soluciones de contención de fugas para tuberías que integran sistemas básicos de ajuste mecánico. Las patentes de James y Alice [US2651329A] [6] y Palmer [US865056A] [7] consisten en tapas de cilindro acopladas a tubos de acero para transporte de fluidos inflamables. Las tapas están aseguradas y ajustadas contra el tubo, empleando elementos mecánicos o tornillos para la generación de bloqueos o ajustes. La patente [US3496963A] [8] propuesta por Bardgette et al., Implementa por su parte, una vejiga articular junto a una pinza convencional. Esta vejiga es llenada de fluido gaseoso o líquido, posterior al montaje de la pinza, generando así, presión negativa sobre el área afectada. Esta innovación es uno de los primeros sistemas que implementa principios de alivio de esfuerzos o de rehabilitación en tuberías.

En la década de 1980, se hicieron invenciones incorporando el principio de alivio de esfuerzos para el sellado de fugas en tuberías de transporte de hidrocarburos. La patente de British Gas Corp [GB2093146A] [9] integra el uso de resina inyectable a presión dentro de una camisa de recubrimiento, generando presión de apriete y sellado en la superficie externa de la tubería defectuosa. La patente de Manfred [US4448218A] [10] incorpora el uso de chaquetas con una pared interior flexible, además de la inyección de resinas de solidificación en frío para la detención del crecimiento de defectos superficiales o de fugas. La inyección de resinas en estas soluciones busca generar un contacto de ajuste entre la intervención y el tubo. La patente de Stig [US4647072A] [11] utiliza el principio mecánico del resorte para generar fuerzas de compresión en un elemento de camisa que cubre la tubería. Estos desarrollos tienen la principal desventaja de que los esfuerzos de compresión generados por la resina en estado líquido desaparecen cuando la resina se solidifica y sufre una gran contracción volumétrica. Por lo

tanto, estas soluciones ofrecen un efecto de rehabilitación parcial o nulo, dependiendo de la condición de contacto al interior de la camisa. Finalmente, la invención de Keith [US4653782A] [12] está hecha de una abrazadera con paredes internas que buscan retener las fugas presentes en las tuberías. Las dos mitades de tapas se sujetan entre ellas, generando el sello requerido para la contención.

En los 90's, las patentes desarrolladas fueron similares a las creadas en la década anterior. Las invenciones de Gilleland [US5042532A] [13] y Charles [US5118139A] [14] refieren a mangas y abrazaderas, respectivamente. Estas creaciones buscan generar rigidez para el sellado de fugas. La patente de G. Alfeo y P. Valentino [US5345972A] [15] representa un avance en el desarrollo de soluciones de rehabilitación de alivio inmediato de esfuerzos, en presencia de defectos en la tubería. Consiste en tapas soldadas alrededor del tubo defectuoso, que constan de sellos circunferenciales en los extremos. Posteriormente, se inyecta resina a presión en el espacio intersticial entre la tubería y la camisa de reparación.

En la década siguiente, las invenciones de Jim [US6220302B1] [16], Ronald A. [US6276726B1] [17] y Gaston et al. [US6675836B1] [18] buscan reparar fugas implementando abrazaderas de sellado mecánico contra la tubería. Las invenciones de Laurence S. et al. [US6305719B1] [19] y Abdulaziz K. [US7617843B1] [20] integran el uso de resinas de relleno a presión de propiedades de fraguado rápido, dentro de camisas o abrazaderas metálicas que presentan espacio intersticial destinado para tal fin. Estas patentes se centran en la reparación de fugas en tuberías de transporte de gas natural. Estos desarrollos replican lo que fue patentado en la década de 1990. Sin embargo, algunas de las patentes de la década, proponen un sistema híbrido de mangas rellenas de resina que conjugan el uso de un sistema de ajuste mecánico para la tubería defectuosa. Las patentes de Nagendran et al. [US20040129373A1] [21], Boulet et al. [FR2851635A1] [22], Станислас et al. [RU2300045C2] [23] y D'Auria et al. [US20060162797A1] [24] se constituyen de materiales compuestos y/o varillas de acero dispuestas helicoidalmente en la tubería, que comprimen el tubo mientras este se encuentra en funcionamiento. Estos elementos se cubren luego con una camisa removible que tiene un espacio intersticial, que luego se llena con resina a presión. Estas invenciones implementan sistemas híbridos para la reparación de fugas en tuberías. En la segunda mitad de la década del 2000, se logró un avance significativo en el desarrollo de soluciones de alivio de esfuerzos sobre la tubería una vez eran implementados sobre esta. Kakoschke et al. proporcionó una patente [US7066210B2] [25] que genera una presión de compresión en la tubería mediante el uso de camisas con sistemas mecánicos de ajuste. Esta alternativa tiene el poder de llevar a cabo una rehabilitación permanente reduciendo el estado de estrés del defecto y la tubería,

convirtiéndose en una solución “activa”. Entiéndase como solución “activa” todo aquel sistema de rehabilitación que disminuya el estado de esfuerzos de la tubería una vez sea implementado sobre la zona en presencia de un defecto. Finalmente, Borland et al. [US7165579B2] [26] continua con la tendencia de reparaciones activas, aliviando las tensiones de la tubería introduciendo fluido a presión en una camisa metálica.

En la última década, a principios de 2010, las invenciones de Skellern et al. [US20110241342A1] [27], Venero et al. [US20110284115A1] [28], Benson et al. [US20130255816A1] [29], Patriarca [US20160109050A1] [30] y Clark et al. [US8210210B2] [31] continuaron siendo abrazaderas y/o camisas de apriete mecánico, con presencia de ranuras o espacios intersticiales para el llenado con resina. Las soluciones propuestas por Wolf y Peschka [US7950418B2] [32], Rice [US7673654B2] [33] y Morton [US7673655B1] [34] se componen de revestimientos compuestos que fundamentan su funcionamiento en el curado de la fibra y la resina a presión. La invención del sello protector por Lazzara et al. [US8522827B2] [35] introduce el uso de varias fibras compuestas que, curan y protegen a su vez, la superficie de las juntas de acero contra la corrosión. La patente de investigación de Neptune [US20150204476A1] [36] muestra la aplicación de capas de fibra unidireccionales, unidas por la aplicación de resinas, formando un único elemento de manga de refuerzo compuesto. A su vez, la solución propuesta por Morton et al. [US7900655B2] [37] integra el uso de material compuesto para la reparación de defectos. La aplicación de material compuesto se realiza dentro de un sistema de camisa extraíble que permite la inyección de un fluido gaseoso o líquido que alcanza una presión similar o igual a la de la tubería. La fibra compuesta se tensa y luego se cura en estas condiciones. Posteriormente, se retira la manga superior, dejando una envoltura de material compuesto que alivia las tensiones del área defectuosa. Finalmente, en 2014, un sistema híbrido fue desarrollado por Souza [US20140048164A1] [38], que consiste en bandas de compresión que generan tensión en la tubería, cubiertas por resinas epoxi que evitan la penetración de la humedad. Todo el sistema está cubierto por un material compuesto que protege contra la corrosión.

Se observa que la mayoría de las patentes generadas como soluciones de reparación/rehabilitación de tuberías de transporte de hidrocarburos, iniciaron con el uso de abrazaderas de mera contención mecánica, a refuerzos más complejos basados en mangas que implementan materiales compuestos. Los últimos avances implementaron una hibridación de las alternativas de solución, integrando el uso de opciones mecánicas junto con los materiales compuestos en presencia de un defecto. Estos desarrollos, contemplan la importancia de crear un efecto similar a la reducción de la presión interna de forma que se logre un alivio las tensiones del sustrato, utilizando mecanismos externos para ello. Este hecho

destaca la importancia de la aplicación de sistemas de rehabilitación “activos” para aumentar la confiabilidad de las reparaciones en tuberías a presión o tuberías de transporte de hidrocarburos, basado en los principios de propagación dictaminados por la mecánica de la fractura del material. Este principio también es compartido por PRCI [39], donde se establece la importancia de la reducción de presión durante la implementación del método de reparación.

Teniendo en cuenta lo anterior, se muestra en la **Figura 2** un cronograma que resume la evolución de las patentes para la reparación y rehabilitación de tuberías de transporte de fluidos inflamables.

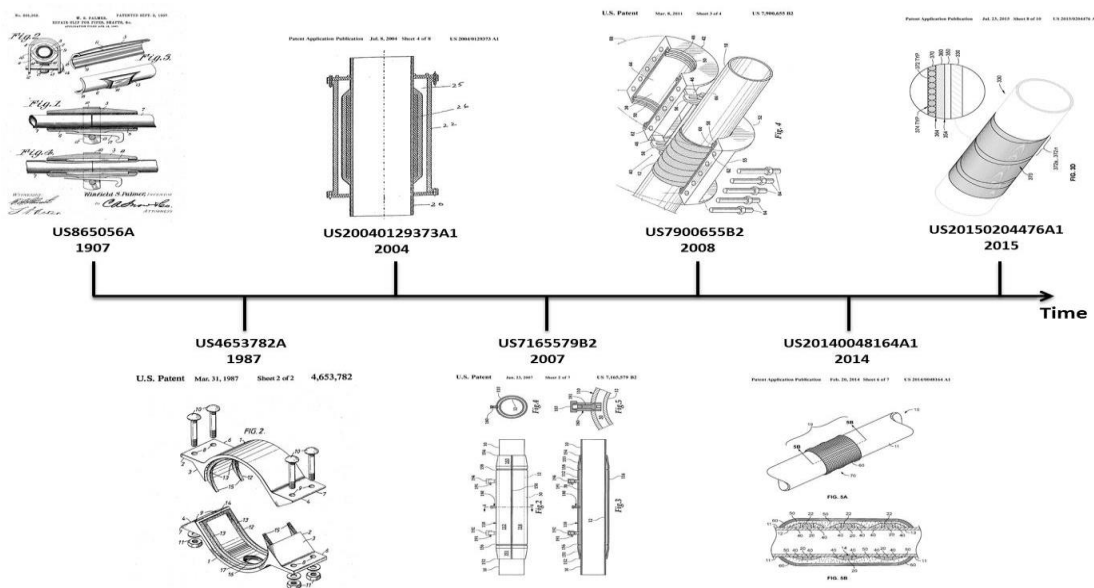


Figura 2. Línea de tiempo de evolución de sistemas de reparación/rehabilitación de tuberías de transporte de hidrocarburos.

5. MOTIVACIÓN EXPERIMENTAL

Los elementos fabricados con materiales compuestos fallan debido a diversos mecanismos intrínsecos de su composición, que ocurren a escala microscópica, los cuales incluyen fractura de fibra, desunión de fibra/matriz y/o microfisuración de matriz. El modelado de este tipo de soluciones está emergiendo como una técnica efectiva para abordar estos problemas [40].

Algunos modelos desarrollados para la caracterización del comportamiento mecánico de compuestos con fibras son abordados por modelos matemáticos que integran el análisis macro-mecánico y/o microestructural. El abordaje micromecánico se ha basado principalmente en el supuesto de que la disposición espacial de las fibras del compuesto es periódica. Este enfoque conduce a modelos computacionalmente eficientes, donde las propiedades efectivas pueden predecirse con precisión. Sin embargo, cuando se aplican a predicciones relacionadas con fallas/daños, estos modelos simples generalmente no funcionan bien por la no periodicidad de la falla.

Trias et al. [41] compararon las distribuciones de tensión y deformación de un modelo periódico y un modelo aleatorio para una matriz reforzada con fibras de carbono. La comparación muestra que los modelos periódicos se pueden usar para la simulación de propiedades efectivas, pero se deben considerar modelos aleatorios para la simulación de fenómenos locales tales como el daño local o el agrietamiento de la matriz. Hojo et al. [42] investigaron el efecto de las distribuciones locales de fibra para laminados epoxi de fibra de carbono unidireccional cargados en tensión. Se encontró que, para una matriz de fibras irregulares, el valor absoluto de las tensiones normales interfaciales aumentaba rápidamente cuando la distancia entre las fibras era inferior a 0,5 μm .

Pyrz [43] encontró que en un compuesto de matriz polimérica, el estrés global de falla está significativamente influenciado por el tipo de patrón espacial de fibra presente. También se muestra que las distancias entre las fibras tienen un efecto considerable sobre la capacidad de soportar esfuerzos en la microestructura, con tensiones máximas que se producen en regiones donde las fibras se encuentran muy próximas entre sí.

A partir de lo anterior, el modelado en múltiples escalas surge como una técnica efectiva para abordar estos problemas [44] mediante el cual, un modelo micromecánico en la forma de un elemento de volumen representativo (RVE) (elemento diferencial) se acopla a un modelo macro-

mecánico para predecir el comportamiento del compuesto en general, exhibiendo el mismo comportamiento esfuerzo-deformación que el elemento macro. Los modelos de núcleo duro (superposición de discos que representa las fibras) desarrollados como medio de representación de elemento diferencial de estudio, poseen una limitación en la interferencia de los discos modelados puesto no permite que se generen fracciones de volumen mayores al 54% [45]. Por lo tanto, no se puede usar para representar la microestructura de materiales compuestos de alta resistencia que generalmente tienen fracciones de volumen en la región del 60% [40]. Melro et al. [46] utilizó una configuración generada por un modelo de núcleo duro y luego sometió las fibras a pequeños desplazamientos arbitrarios, lo que creó regiones ricas en matriz. Esto resultó en fracciones de volumen de fibra del 65%.

Por su parte, Trias [47] analizó las microestructuras de cuatro compuestos de fibra de carbono. Se concluyó que, debido a la varianza de distribución de la fibra de un material compuesto a otro, un enfoque de reproducción microestructural, es decir, la conversión de imágenes digitales en modelos de elementos finitos, son más apropiados para el modelado micromecánico que el uso de algoritmos que asumen un patrón de distribución espacial aleatorio para las fibras en la matriz. Por tanto, la introducción de modelos de elementos finitos comparativos con modelos macromecánicos se muestra como una opción válida para evaluación y verificación de parámetros.

Pyrz [48] demostró que para tres condiciones de curado diferentes aplicadas a un compuesto de fibra de vidrio/epoxi, los patrones espaciales resultantes en cada microestructura diferían considerablemente. Se concluyó que las suposiciones previas con respecto a la aleatoriedad completa o la regularidad perfecta en la microestructura pueden estar equivocadas y los patrones producidos dependen en gran medida del proceso y las condiciones de fabricación. Esta investigación abre una puerta a la investigación enfocada en modelos macromecánicos que consideren el proceso de manufactura y elaboración de los materiales compuestos, así como sus condiciones de desempeño. La experimentación resulta como una oportunidad de caracterización pertinente para este tipo de materiales.

Usualmente, las fibras utilizadas en la elaboración de materiales compuestos poseen diferentes propiedades mecánicas que la matriz. Los compuestos reforzados con fibras exhiben características direccionales bajo cargas. Esto se debe principalmente a su comportamiento de material anisotrópico natural [49]. Las propiedades mecánicas de estos dependen de la forma y orientación de las fibras utilizadas en el material.

En el trabajo de Fu-kuo Chang et al. [50] se presenta un modelo de daño progresivo para compuestos laminados con muescas, los cuales son sometidos a cargas de tracción. Se utilizaron orientaciones arbitrarias de fibra. Las tensiones y deformaciones en los elementos de estudio laminados se analizaron sobre la base de la teoría de laminación clásica con la consideración de la no linealidad del material. Se desarrolló un programa de elementos finitos no lineales, basado en el modelo, para laminados que contienen un orificio circular. Los resultados numéricos se compararon con los datos experimentales. Este modelo integra la variación de orientación de la fibra y la experimentación como medio de validación. El modelo desarrollado permite determinar los tipos de daño, la extensión del daño, la degradación del material en el área dañada, la resistencia residual y la carga última.

Frangopol et al. [49] se enfoca en materiales compuestos reforzados con fibras unidireccionales, especialmente en placas laminadas bajo cargas aleatorias. A partir de lo anterior, se determinó que la presencia de una capa adicional en una placa laminada compuesta no necesariamente aumenta la fiabilidad de la placa. De hecho, es posible que esta capa adicional aumente la probabilidad de falla de otras capas. Por esta razón, es necesario considerar los efectos de interacción de las capas, en la evaluación de confiabilidad de los compuestos. A su vez, la orientación de las fibras tiene un efecto significativo en la fiabilidad de las placas. De acuerdo a esto, la probabilidad de falla de una placa laminada de compuesto reforzada con fibra puede reducirse significativamente si se optimizan el número y el grosor de las capas, y la orientación de las fibras bajo las combinaciones de cargas prescritas.

Los compuestos de polímero reforzado con fibra corta (SFRPC) tienen ventajas significativas, como una alta tasa de producción mediante técnicas de fabricación tales como el moldeo por inyección y, además, un costo más bajo que los compuestos de fibra continua. Mortazavian et al. [51] realiza una investigación sobre los efectos de la anisotropía y la orientación de la fibra sobre el comportamiento a la tracción de dos termoplásticos reforzados con fibra corta de vidrio. El estado de las fibras en la matriz depende de las condiciones del moldeo por inyección, la geometría del molde, la fracción volumétrica de las fibras, la longitud inicial de las fibras y las propiedades físicas y viscoelásticas de la matriz. Una de las mayores conclusiones fue que la tenacidad a la tracción es una función importante de la orientación del material y la fibra, pero no muy sensible a las variaciones en la velocidad de deformación.

La investigación realizada por Ekşi et al. [52] muestra resultados de variación de propiedades mecánicas resultantes de una experimentación básica realizada a materiales compuestos con matriz epóxica. En dicho estudio, los autores modificaron la orientación de las fibras, la

complejidad del entramado (unidireccional o tejido) y el tipo de fibra para determinar el comportamiento de las diferentes probetas manufacturadas. Entre estas, se realizaron pruebas de tensión, compresión y cortante. Determinando que la resistencia a la tensión de probetas de compuesto conformadas por aramida tejida, presentaban un mejor comportamiento mecánico que las demás fibras. Además de este estudio, Ekşi et al. [53] realiza un estudio experimental sobre los distintos tipos de fibra previamente implementados (fibra de vidrio, fibra de carbono y fibra de aramida) sometiendo probetas tubulares a flexión. Se concluyó que la carga de flexión y la resistencia a la flexión aumentaron al aumentar el número de capas del compuesto. A su vez, los tubos compuestos híbridos reforzados con fibra de aramida tienen una gran capacidad de carga y capacidad de absorción de energía comparados con aquellos reforzados con fibra de vidrio y fibra de carbono. Sin embargo, este estudio carece de validación estadística. Por tanto, genera una oportunidad de avance en la generación de modelos estadísticos y experimentales que describan el comportamiento de estos materiales.

De acuerdo con lo anterior, dependiendo de la longitud de las fibras y su orientación, variarán las propiedades mecánicas del compuesto. Si las fibras se cortan en pequeñas secciones y se colocan de manera aleatoria en la matriz polimérica, el compuesto resultante tendrá un comportamiento bastante isotrópico. Sin embargo, si se utilizan fibras que recorren la longitud del compuesto en una dirección predeterminada, las propiedades mecánicas variarán según la dirección de carga. El compuesto tendrá propiedades diferentes en dirección longitudinal de las fibras que respecto a cualquier otra dirección. La realización de pruebas de tracción en muestras preparadas en varias direcciones es un enfoque común y simple para evaluar la anisotropía en este tipo de materiales.

En la industria, los materiales compuestos son expuestos a una gran variedad de aplicaciones como protectores térmicos y aplicaciones estructurales, expuestas también al calor. Algunos ejemplos de estos usos incluyen escudos térmicos de naves espaciales para la reentrada atmosférica, revestimientos de boquillas de motores de cohetes, cargadores de misiles, deflectores de explosiones, etc. [54]. Por este motivo, la generación de modelos descriptivos que permitan predecir el comportamiento mecánico de los compuestos sometidos a calor resulta de gran utilidad para la creciente industria. Henderson et al. [55] busca modelar la respuesta térmica de un compuesto polimérico sometido a descomposición, mediante un modelo matemático y validación experimental, en ausencia de la recesión de la superficie. Los compuestos de esta investigación no son de carácter fibroso. Además, para muchos de los materiales poliméricos de interés, existe una escasez de datos precisos de propiedades térmicas, cinéticas y de transporte.

En tuberías de transporte de hidrocarburos, el flujo de calor radial en estado estacionario está completamente gobernado por las conductividades térmicas de la pared de la tubería, el aislamiento circundante y el suelo. El suelo que rodea una tubería enterrada puede contener una cantidad considerable de calor. Sin embargo, en el flujo de hidrocarburos en tuberías en estado estable, la capacidad de calor del suelo simplemente puede despreciarse, ya que el calor no logra transmitirse sobre una partícula diferencial en movimiento constante. Por otro lado, la temperatura puede elevarse de manera sustancial hasta máximo 100°C, luego de estaciones compresoras y/o bombeo de acuerdo a Bruschi [56]. Esto impone un reto muy grande al comportamiento de los materiales compuestos en caso de realizar una reparación cerca de una zona de bombeo del hidrocarburo.

6. OBJETIVOS

GENERAL

- Evaluar y validar experimentalmente el comportamiento termo-mecánico de materiales compuestos destinados a la rehabilitación de tuberías de transporte de hidrocarburos considerando: tipo de fibra, orientación de la fibra y temperatura de trabajo.

ESPECÍFICOS

- Caracterizar del estado del arte de tecnologías implementadas para reparación/rehabilitación de tuberías de transporte de hidrocarburos.
- Validar la pertinencia del uso de materiales compuestos como solución de rehabilitación.
- Diseñar la experimentación para poder determinar la mejor combinación de tipo de fibra, orientación de la fibra y el efecto temperatura de trabajo para rehabilitación de tuberías de transporte de hidrocarburos.
- Proponer líneas de investigación para el desarrollo de patentes y sistemas de rehabilitación activos en líneas de transporte de hidrocarburos.

7. MARCO TEORICO

7.1. CLASIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE MÉTODOS DE REPARACIÓN/REHABILITACIÓN

Los métodos implementados para la reparación/rehabilitación de tuberías de transporte de hidrocarburos, pueden ser clasificados y seleccionados de distintas formas de acuerdo con criterios “tradicionales” utilizados en la industria o comentados por la literatura.

Un primer criterio clásico de caracterización y/o selección de dichas técnicas se relaciona con el propósito de la intervención a realizar. Esto refiere al nivel de restitución de la integridad, seguridad y operatividad del elemento a intervenir. En general, esta forma de clasificación de las intervenciones realizadas en tuberías ha sido presentada en la mayoría de las revisiones encontradas en la literatura especializada sobre el tema. Un segundo enfoque, dentro de lo usualmente implementado, corresponde a la posibilidad de realizar la intervención con o sin la suspensión del servicio. De acuerdo con Pinzon et al. [57]:

Métodos de rehabilitación en caliente: los métodos que se pueden hacer en servicio sin suspender o modificar los parámetros de operación de la tubería, se llaman métodos de rehabilitación en caliente. Por ejemplo, abrazaderas de compresión aplicadas a fugas de tubería.

Métodos de rehabilitación tibios: estos incluyen rehabilitaciones que se realizan en servicio, reduciendo el nivel de algunos parámetros operativos. Por ejemplo, la aplicación de mangas de refuerzo compuestas sobre un defecto de tubería, el cual requiere una disminución temporal de la presión de flujo.

Métodos de rehabilitación en frío: son métodos de rehabilitación que requieren la suspensión del servicio para su implementación. Por ejemplo, cortar y reemplazar una sección de tubería.

Un último criterio de clasificación implementado por la industria corresponde a la selección de soluciones de acuerdo a la facilidad de implementación y riesgo generado por las técnicas de reparación/rehabilitación durante la intervención, que dependerá de la cantidad y complejidad de la instalación, el nivel de capacitación de los operadores y el nivel de exposición a riesgos mecánicos, químicos o eléctricos asociados con la intervención, entre otros.

Considerando la variedad de requisitos, tanto de operadores como de mantenedores de tuberías de transporte de hidrocarburos, se propone un nuevo criterio de clasificación y análisis de intervenciones que, resulta relevante para la implementación de soluciones de reparación/rehabilitación en la industria. Este nuevo concepto refiere a la necesidad del método utilizado para generar un alivio inmediato de esfuerzos del elemento afectado por presencia de un defecto. En estas circunstancias, se denominarían dichos métodos como activos; sin embargo, aquellas soluciones que funcionan como respaldo solo cuando se produce una falla total o parcial de la sección afectada, serían denominadas como alternativas de reparación/rehabilitación pasiva. Cuando un segmento de tubería tiene un desperfecto, y se somete a una presión de operación dinámica u opera con esfuerzos estáticos bajo un medio corrosivo, es importante aliviar de manera inmediata o en un período corto de tiempo los esfuerzos en el material del sustrato de acuerdo con los principios básicos de la mecánica de fractura. Esto puede lograrse al reducir la presión de operación o mediante la aplicación de un método de "rehabilitación activa" que produce un efecto similar al obtenido con la reducción de presión interna. Este criterio activo es conveniente en situaciones con crecimiento progresivo de daño, muy cerca de los valores límites establecidos por los estándares o, cuando la tasa de evolución del mecanismo de falla crece exponencialmente en el área intervenida. En este orden de ideas, las intervenciones activas evitan un mayor daño o el colapso eventual del segmento de tubería dañado.

7.2. DESPERFECTOS

Las tuberías son propensas a fallas que dependen del tipo de material de fabricación, su diseño físico, la edad o tiempo en servicio, su funcionalidad, el entorno interno y externo al que están sujetas. El daño y/o el colapso de una tubería son el resultado de una compleja interacción entre varios mecanismos que ocurren dentro y alrededor del tubo de acuerdo con Sihna et al. [58].

En base a lo anterior, es relevante definir los términos asociados a la presencia de desperfectos en las tuberías. Las anomalías corresponden a una desviación de la condición nominal de la tubería, promoviendo la pérdida de rendimiento en las mismas. Las anomalías con características que no exceden los límites estandarizados se conocen como imperfecciones, y las que superan dichos límites establecidos, se clasifican como defectos.

Las anomalías pueden ser incorporadas durante la construcción de la tubería, y/o generadas a largo plazo por la operación regular del activo. Aquellas incorporadas representan condiciones que afectan el rendimiento de la línea de transporte después de su instalación. Estas pueden

ser desviaciones en la alineación del ducto, articulaciones sueltas debido a las vibraciones, tubería aplanada u ovalada, caída debido a posicionamiento, tensiones causadas por las cargas de relleno dinámico, eliminación de revestimiento de la zanja, sobrecarga por compactación, etc. Cossio et al.[59]. Las anomalías a largo plazo por su parte son el resultado del proceso regular de deterioro de la tubería. Algunas causas de este deterioro son la corrosión (generación de sulfatos) debido a los gases de transporte internos de la tubería, excesivos flujos hidráulicos, falla estructural, debilitamiento del suelo, variaciones medio ambientales, fugas, infiltración y la erosión. A su vez, las tuberías de transporte de hidrocarburos generalmente están hechas de metales ferrosos que son susceptibles a la corrosión externa, y más aún, si están operando en ambientes altamente corrosivos como en las profundidades del mar u otras áreas con gran humedad. De acuerdo con Shamsuddoha et al. [60], la corrosión es sin duda uno de los principales desafíos para la industria del transporte de hidrocarburos, ya que desencadena otros mecanismos de falla que pueden provocar el colapso de la estructura, y múltiples efectos en las personas y el medio ambiente. De acuerdo a Ossai et al. [61], han ocurrido 360 muertes, 1368 daños y 894 incidentes relacionados con fallas en las tuberías que transportan petróleo, gas o algún fluido peligroso entre 1995 y 2014 en los Estados Unidos.

Es probable que se produzcan fracturas en tuberías cuando los esfuerzos por causa ambiental y operacional actúan en tuberías cuya integridad estructural se ha visto comprometida por corrosión, degradación, instalación o defectos de fabricación. Los tipos de rupturas de tubería se clasifican en tres categorías: (a) roturas circunferenciales, causadas por tensiones longitudinales; (B) roturas longitudinales, causadas por tensiones transversales (tensiones de deformación); y (c) grietas de campana, causadas por esfuerzos transversales en uniones de la tubería. Las rupturas circunferenciales debido a la tensión longitudinal son típicamente el resultado de una o más de las siguientes ocurrencias: (i) contracción térmica, (ii) estrés (especialmente en suelos de arcilla) o grandes vacíos en cimentaciones de tuberías como resultado de fugas, (iii) excavaciones y prácticas de cimentación inadecuadas, y (iv) interferencia de terceros como interrupciones accidentales [62]. Además de estos tipos de ruptura, las picaduras están presentes debido a corrosión o el impacto de cuerpos externos en la tubería

De acuerdo con lo anteriormente mencionado, los defectos pueden ser clasificados como:

- Pérdida de material externo: por lo general, es el resultado de la corrosión externa y se caracteriza por picaduras o grandes depresiones con geometría irregular visible.

- Pérdida de material interno: son el resultado de la corrosión interna. Solo se puede detectar desde el exterior a través de técnicas de inspección ultrasónicas que midan el espesor de tubería.
- Fallas por indentación: el contacto con el equipo de excavación generalmente causa estos defectos. Pueden ser abolladuras, grietas o arañazos. Pueden contener grietas que pueden provocar o causar fatiga, corrosión bajo tensión o quemaduras de arco (soldadura).
- Grietas, arañazos, muescas o ranuras orientadas longitudinalmente.
- Defectos orientados transversalmente (no en una unión soldada).
- Grietas orientadas a lo largo de una espiral.
- Hebillas o arrugas.
- Quemaduras de arco.
- Ampollas.

En consecuencia, mantener la integridad de los sistemas de transporte es crucial, dada la naturaleza explosiva de los fluidos que se transportan, cualquier falla podría tener consecuencias catastróficas, con costos sumamente elevados. Debido a las anteriores razones, existe una creciente conciencia y preocupación entre los operadores y mantenedores de la industria Oil&Gas de desarrollar métodos efectivos y de bajo costo de reparación/rehabilitación que reduzcan las pérdidas económicas asociadas a accidentes y los costos de mantenimiento de la estructura.

7.3. TÉCNICAS DE INTERVENCIÓN

Las técnicas implementadas para la reparación y/o rehabilitación de tuberías de transporte de hidrocarburos, poseen principios prácticos similares, lo cual permite que puedan desenvolverse para ambas funciones de acuerdo con el requerimiento del operador. La reparación/rehabilitación de tuberías se puede realizar, en términos generales, de dos maneras: (i) desde el interior de la tubería; o (ii) desde el exterior del tubo. El primero no requiere la ejecución de zanjas alrededor del tubo, evitando así los procesos de excavación y las alteraciones que afectan las áreas circundantes; sin embargo, la interrupción del servicio es necesaria durante este tipo de operación. Por el contrario, los métodos externos requieren la construcción de zanjas (excepto en las secciones aéreas), sin requerir la interrupción el servicio. Debido a las características de diseño de la tubería y la necesidad de garantizar la disponibilidad del suministro, los procesos de rehabilitación generalmente utilizados en la industria de hidrocarburos, son los de intervención externa.

Las siguientes son las principales técnicas utilizadas para la reparación/rehabilitación de tuberías sin la necesidad de interrupción en el servicio, referidas en Farrag [63]:

1. Rectificado (limado).
2. Manga de refuerzo de cierre completo.
3. Abrazaderas mecánicas.
4. Envolturas con materiales compuestos.
5. Deposición de metal por soldadura.
6. Parche.
7. Tapón en caliente.

La aplicación de cada uno de estos métodos depende del tipo de falla y de las condiciones de operación a las que estará expuesta la tubería. Es una tarea desafiante elegir un método de reparación particular ya que hay muchas variables relevantes en el proceso de selección, además de los criterios y experiencia que el operador de la línea posea respecto a los mismos.

7.3.1. RECTIFICADO (LIMADO)

El rectificado es una técnica que consiste en alisar la superficie de la tubería para eliminar imperfecciones, para luego recubrir el tubo y así, protegerlo contra la corrosión. Por lo general, se realiza utilizando un disco abrasivo en las áreas donde se encuentran los imperfectos superficiales. Este método se aplica principalmente cuando la tubería tiene defectos, como abolladuras o grietas, y solo se usa si es posible eliminar el concentrador de esfuerzos.

Especial cuidado debe tenerse, respecto a la reducción excesiva del espesor de la tubería. También es importante controlar la cantidad de calor por abrasión suministrado a la tubería, debido al riesgo de ignición del fluido transportado. Cuando se lleva a cabo este tipo de operación, la presión de trabajo se reduce aproximadamente un 20%.

El código ASME B31.4 refiere la posibilidad de este tipo de técnica en hasta un 10% del espesor nominal de la tubería sin limitar la extensión de la zona de limado, y hasta un 40% del espesor solo si el tamaño del defecto no supera la geometría límite especificada por el estándar.

Ventajas:

- Procedimiento rápido.
- Bajo costo.

- No requiere personal y/o equipos altamente especializados.
- Se puede usar junto con otras técnicas de reparación/rehabilitación.

Desventajas:

- La presión de operación debe ser disminuida.
- Limitaciones en tamaño de defectos a corregir.
- Solo para defectos externos.
- Requiere una inspección adicional mediante tintas penetrantes o partículas magnéticas.
- No restablece totalmente la integridad de la sección afectada.

7.3.2. MANGA DE REFUERZO DE CIERRE COMPLETO

Como se indica en ASME PCC 2 [64], las mangas o camisas de acero envolventes consisten en carcasas cilíndrica colocadas alrededor de la sección de la tubería afectada, para luego ser soldadas a lo largo sus costuras longitudinales. Es una opción recomendada cuando la tubería presenta signos severos de desgaste, deterioro o daño.

Las mangas de refuerzo se clasifican como tipo A y tipo B. Las camisas tipo A (**Figura 3a**) no poseen soldadura de fijación de la manga al sustrato, por tanto, no contienen presión. Se usan para defectos donde no hay fugas. Las mangas tipos B (**Figura 3b**) se encuentran soldadas a la tubería de transporte y pueden usarse para reparar fugas o reforzar áreas con defectos circunferencialmente orientados. Dependiendo del diseño, este tipo de refuerzo puede resistir parcial o totalmente la presión del tubo. Este tipo de método requiere un mayor control técnico en la fabricación e inspección de su integridad.

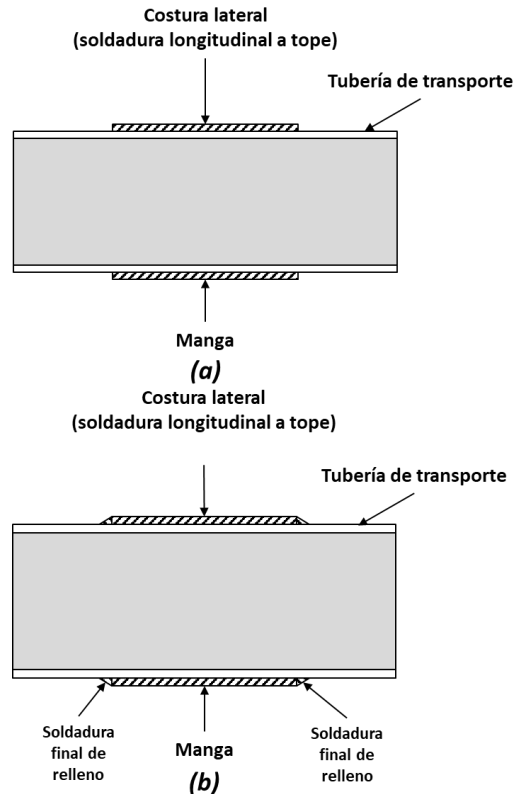


Figura 3. A) Representación de manga tipo A. b) Representación de manga tipo B.

Manga tipo A: la función de este tipo de manga es reforzar el área del defecto, restringiendo aumento de diámetro o la hinchazón radial de la tubería, tanto como sea posible. La manga debe instalarse minimizando el espacio libre con la tubería.

Para garantizar el efecto de refuerzo, se deben garantizar las siguientes condiciones:

- La presión de la tubería debe reducirse durante la instalación de la manga.
- Se debe aplicar una carga externa a la reparación/rehabilitación para forzar el dispositivo contra la superficie del tubo.
- Se debe usar un material para llenar el espacio anular entre la manga y la tubería.

Ventajas:

- Fabricación simple
- No requiere rigurosa inspección no destructiva.
- Puede tener espesores más pequeños que la tubería ($2/3 t$).
- Alta integridad estructural con defectos cortos ($L < \sqrt{20Dt}$) D: diámetro; t: espesor.

Desventajas:

- No es adecuado para defectos orientados circunferencialmente.
- No es adecuado para la reparación de fugas.
- Genera un espacio anular que puede ser difícil de proteger contra la corrosión.
- Difícil instalación en accesorios o secciones curvas.

Manga tipo B: esta configuración de manga está conectada al tubo mediante soldadura, permitiendo la reparación de fugas y reforzando las áreas con defectos orientados circunferencialmente. Se recomienda soldar a tope con cualquiera de las tres variantes que se muestran en la siguiente **Figura 4**. No se recomienda realizar soldadura de filete.

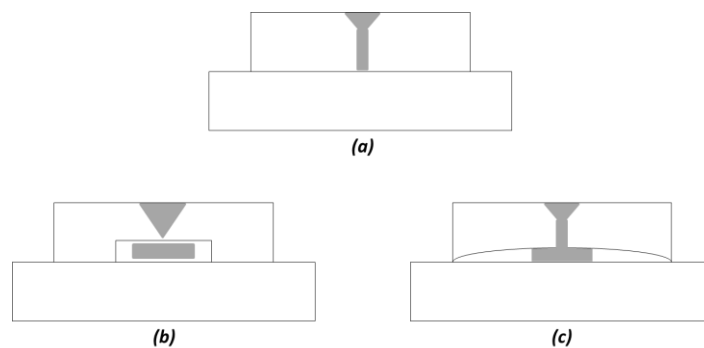


Figura 4. Soldadura a tope aceptable en mangas tipo B. (A) Sin placa de respaldo; (B) Con placa de respaldo y ranura; (C) Con placa de respaldo sin ranura.

La manga tipo B debe diseñarse para resistir la misma presión de transporte del sustrato, lo que implica que tanto el grosor de la pared, como el grado del material de la manga deben ser al menos los mismos o equivalentes a los del tubo [65]. Es aceptable usar grosores más finos o más grandes dependiendo de la capacidad mecánica del material implementado. En caso de que el tipo de junta soldada sea como se muestra en la figura 2b, se recomienda un mayor grosor de la camisa, para compensar la pérdida de espesor debido a la ranura. Cuando el grosor de la manga excede la medida del grosor de la tubería en más de 2.4 mm, se recomienda incluir un chaflán con una pendiente de 4:1.

Las mangas tipo B requieren una fabricación más precisa que las mangas tipo A. Un montaje deficiente podría reducir la capacidad de absorción de carga en la manga, disminuyendo a su vez, el efecto de refuerzo prestado por la misma. Además, se requiere personal técnico calificado y un procedimiento de soldadura adecuado. Para la soldadura en tuberías en servicio, se deben considerar las velocidades de enfriamiento y la profundidad de penetración. La soldadura de filete no se recomienda como se indica en Otegui et al. [66]. En caso de incluir una

ranura para soldadura, el espesor de la reparación debe compensar la pérdida de material resultante de la ranura.

La longitud de la manga debe extenderse al menos 50 mm más allá de los límites del defecto en cada extremo del mismo. De acuerdo a *Otegui et al.* [67], si hay varias mangas a lo largo de la tubería, deben instalarse con un espaciamiento mínimo de soldadura correspondiente la mitad del diámetro de la tubería, para evitar una concentración de tensión entre dos diferentes reparaciones o rehabilitaciones.

Cuando la longitud de la intervención es mayor que cuatro veces el diámetro de la tubería, se deben considerar los soportes en la tubería durante la operación de rehabilitación.

Ventajas:

- Se puede usar para reparar fugas.
- Adecuado para defectos orientados circunferencialmente.
- Absorbe la carga longitudinal por cargas laterales.
- Longitudes de tubería largas pueden ser rehabilitadas.
- Adecuado para reforzar áreas con corrosión interna.

Desventajas:

- Requiere una fabricación cuidadosa.
- Requiere una inspección no destructiva rigurosa.
- Requiere el mismo espesor que la tubería.
- Puede inducir cambios microestructurales (tuberías en servicio).
- La concentración del esfuerzo se debe considerar en los filetes en los extremos del mango.
- Difícil instalación en accesorios o secciones curvas.

7.3.3. ABRAZADERAS MECÁNICAS

Este método consiste en dos capas o tapas que están unidas mecánicamente, generalmente mediante pernos, para formar un caparazón o carcasa que refuerza el área afectada de la tubería. Se puede usar en imperfecciones tales como fugas o daños causados por cargas elevadas.

Este tipo de solución se caracteriza por ser muy robusta. Se utilizan pernos para generar la fuerza de compresión en la tubería y para evitar el crecimiento de grietas, lo que puede inducir

tensiones adicionales en la tubería, de acuerdo con Oh et al. [68]. Su facilidad de instalación y el bajo nivel de capacitación requerido por los operadores lo convierten en un tipo de intervención muy útil y práctico.

Es posible encontrar algunas abrazaderas capaces de producir sellado por sí mismas sin soldar, utilizando algún material como interfaz entre la tubería y la carcasa. Hay una gran variedad de abrazaderas, aunque la mayoría son elementos que ocupan un gran volumen, estos pueden tener diferentes formas y configuraciones dependiendo de cada fabricante. Hopkins et al. [69] informaron que algunos se pueden instalar en secciones curvas de la tubería sin ningún problema.

Su gran desventaja es la corrosión, ya que los componentes metálicos con los que se fabrican las abrazaderas no son muy adecuados para trabajar en entornos altamente corrosivos. También pueden surgir problemas de sellado, sin embargo, esto puede resolverse aplicando soldadura [39].

Por lo general, las abrazaderas tienen un componente elastomérico que puede actuar como sello en caso de fuga en la tubería como se muestra en **Figura 5**.

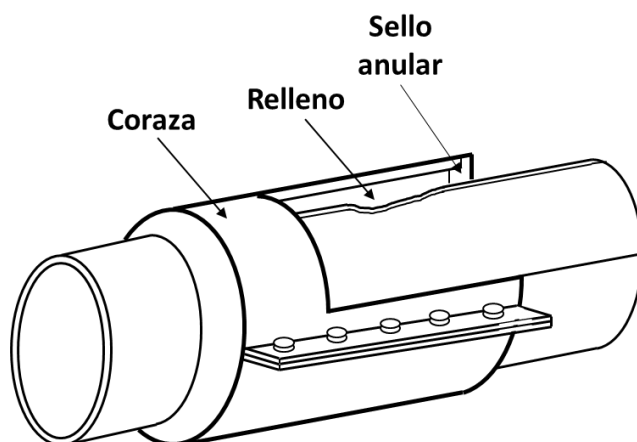


Figura 5. Diagrama de reparación/rehabilitación con abrazadera.

Ventajas

- Se pueden adaptar a cualquier material y diámetro de tubería.
- Instalación rápida y fácil.
- Pueden reparar fugas.

- No requiere una inspección rigurosa.

Desventajas

- Gran peso y tamaño.
- Alto costo de implementación.

7.3.4. MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos se han utilizado durante décadas en aplicaciones estructurales en la industria aeroespacial, naval y de construcción. Diferentes tipos de mangas o revestimientos de refuerzo con materiales compuestos se han desarrollado en los últimos años. Este tipo de refuerzo se ha vuelto atractivo en la industria debido a su simplicidad en la instalación, requiriendo menor nivel de experiencia en el personal técnico que realiza la instalación, la instalación es rápida y se puede aplicar sin suspender la operación. Estos compuestos son implementados en la reparación de defectos en tuberías sin fugas.

Este sistema requiere de al menos dos componentes: uno que será la matriz y otro que será el sistema de refuerzo. Los materiales usualmente implementados para el sistema de reparación compuesto incluyen, pero no se limitan a, fibra de vidrio, aramida o fibra de carbono, embebidos en un polímero termoestable, como, por ejemplo, poliéster, poliuretano, matriz fenólica, éster de vinilo o epoxi [4]. Debe subrayarse que una resina polimérica en sí misma no puede proporcionar la resistencia necesaria para la reparación del sistema, especialmente en el caso de las tuberías de transmisión de media y alta presión. Por lo tanto, para lograr una reparación de alta calidad cuando se utilizan las matrices poliméricas, se deben emplear elementos de refuerzo.

Este tipo de método está permitido por las regulaciones actuales para reparar defectos que relacionen pérdida de espesor, entre estos, el Departamento de Transporte de los Estados Unidos y el estándar CSA 662 (sistemas de tuberías de petróleo y gas).

En general, los refuerzos compuestos pueden instalarse en secciones rectas, curvas o de conexión debido a la flexibilidad que poseen previa al curado. Durante su instalación, es importante mantener la tensión en las fibras.

En términos generales, el diseño de un refuerzo compuesto debe considerar al menos cuatro aspectos:

- El espesor mínimo requerido para el refuerzo.
- La presión a la que se debe instalar el sistema de reparación.
- La pretensión que se aplicará al material compuesto.
- La longitud mínima de refuerzo necesaria, más allá de los extremos del defecto.

Se recomienda que el refuerzo compuesto se extienda al menos 50 mm más allá del borde del defecto. Este tipo de soporte requiere pruebas preliminares de desprendimiento catódico para garantizar su funcionalidad futura.

De acuerdo con los estudios realizados por Duell et al. [70], se calculó que, en promedio, estos sistemas son un 24% más económicos que las soluciones soldadas y un 73% más económicos que la sustitución de la sección de tubería dañada. Además, el uso de este tipo de refuerzo ha demostrado una reducción significativa en la corrosión de la tubería.

Ventajas:

- Pueden ser implementadas en secciones rectas, curvas o en accesorios.
- Rápida instalación.
- Puede ser implementado en servicio.
- Costos de implementación bajos.
- Requieren personal menos calificado que reparaciones/rehabilitaciones que utilicen soldadura.
- El material compuesto ofrece resistencia a la corrosión y al desgaste del sustrato.

Desventajas

- No pueden ser utilizadas para reparar fugas.
- Requiere mantener tensionada la fibra durante la aplicación.
- Requiere estudios preliminares de desprendimiento catódico.
- Resinas limitadas en temperaturas de operación.
- El almacenamiento, transporte y manejo de las resinas debe hacerse bajo condiciones específicas.
- Requiere preparación de la superficie de la tubería.

7.3.5. DEPOSICIÓN POR SOLDADURA

Este método busca restaurar el tubo aplicando soldadura en su superficie. No se puede implementar esta técnica en presencia de una fuga y debido al riesgo que esto implica. Se deben tomar medidas preventivas especiales, como, por ejemplo, el uso de un electrodo particular que

reduzca las emisiones de hidrógeno. El hidrógeno en grandes cantidades podría conducir a la ruptura de la estructura.

Otro aspecto importante es la técnica utilizada para aplicar la soldadura y el número de pasadas de esta, ya que en muchas ocasiones se generan inclusiones dentro de la soldadura debido a prácticas inadecuadas, las cuales pueden conducir a una junta frágil [71]. En las tuberías en servicio, la presión y el flujo del fluido pueden generar a su vez, altas tasas de enfriamiento del área soldada. Esto puede causar fragilidad en la tubería. Es importante entonces seleccionar correctamente la secuencia en el proceso de soldadura.

Ventajas:

- Adaptable a secciones curvas o con presencia de accesorios.
- Reparación rápida.
- Solo requiere metal de relleno como entrada.

Desventajas

- No pueden ser utilizadas para reparar fugas.
- Requiere personal altamente calificado.
- Alto riesgo de penetración a la tubería (espesor mínimo de 3.2 mm).
- Posibles cambios de microestructura en el sustrato.

7.3.6. PARCHES

Los parches son utilizados para reparar fugas. Típicamente, un parche cubre una región limitada de la superficie hasta la mitad de la circunferencia de la tubería. Pueden estar hechos de metal o material compuesto. Este método es muy sensible a los defectos de fabricación y está limitado a aplicaciones de baja presión.

7.3.7. BYPASS EN CALIENTE

Este método se puede utilizar para reparar defectos en tuberías en servicio. El procedimiento de “hot tapping” consiste en conectar un bypass y una válvula en el exterior de una tubería en funcionamiento. La pared de la tubería se corta en el bypass y la sección de la pared se retira a través de la válvula. El uso de grifos calientes evita la pérdida de producto, las emisiones de combustible transportadas y la interrupción del servicio a los consumidores. Por otro lado, se debe garantizar que, al realizar la operación de corte de sección, se cubra todo el defecto en la tubería y que el bypass pueda soportar los esfuerzos a las que se someterá la tubería [39].

7.4. NORMAS EN LA INDUSTRIA DEL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS

Al evaluar la necesidad de intervenir una tubería, es necesario conocer la inminencia de dicha acción. Esta inminencia depende de la capacidad mecánica restante de la tubería para soportar los esfuerzos resultantes de la presión interna del fluido transportado y/o presiones variables, las condiciones externas, flexión, etc. en presencia de un defecto. Como se mencionó anteriormente, la picadura de corrosión externa es el defecto más común en la industria de hidrocarburos. Existen estándares que permiten el cálculo de la vida útil que resta en las tuberías con desperfectos, más específicamente, en presencia picaduras de corrosión. Todos estos estándares se limitan principalmente a la extensión longitudinal del área corroída y a la tensión circunferencial generada por la presión interna de la tubería.

El estándar ASME B31G [72] busca definir la presión operativa máxima permisible (MAOP) en presencia de un defecto de corrosión en la superficie de la tubería, lo cual permite la determinación de la inminencia de una reparación o reemplazo. Para hacer esto, determina el área corroída según la longitud y la profundidad máxima presentes en el defecto. El perfil del defecto supuesto por el método es parabólico. A partir de la geometría del defecto, la geometría de la tubería y las propiedades mecánicas de la tubería (resistencia mínima a la fluencia especificada - SMYS), se calcula la presión máxima segura para la operación. Esto se considera un método tradicional de evaluación, y su aplicación generalmente se enfoca en tuberías con baja dureza o tuberías "antiguas". Esta norma incluye los ámbitos definidos en el Código ASME B31 para tuberías a presión, sistemas de transporte de líquidos ASME B31.4 para hidrocarburos, crudo, amoníaco anhidro y alcoholes; S Sistemas de transporte de lodos en tuberías ASME B31.11. No debe ser el único criterio de estudio cuando la tubería está sujeta a esfuerzos secundarios significativos (por ejemplo, flexión).

Existe una metodología mejorada para evaluar la resistencia restante de una tubería corroída en base a lo establecido en la ASME B31G. Se conoce como ASME B31G modificada, y asegura un restablecimiento de la integridad adecuado, eliminando tanto como sea posible el exceso de conservadurismo incorporado en el criterio preexistente, impulsando a los operadores a evitar cortes e interrupciones innecesarias del servicio. Este método realiza la misma simplificación del perfil corroído propuesto por la ASME B31G; sin embargo, el perfil del defecto es arbitrario. El método modificado es más preciso en la evaluación de la integridad de la tubería que el método original. La corrosión con profundidades que exceden el 80% del espesor de la pared de la tubería o las áreas corroídas que tienen un nivel de presión de falla inferior a 1,1 veces el

MAOP se consideran críticas y deben reemplazarse o repararse inmediatamente para ambos métodos.

Para mantener el alcance principal de un programa de gestión de integridad de tuberías, el programa de computadora RSTRENG [73] se diseñó para contribuir a determinar el factor de seguridad, presión de estallido y MAOP en presencia de defectos de corrosión. El programa también compara resultados con los métodos ASME B31G y ASME B31G modificado. Utiliza el factor de tres términos de corrección de geometría (factor Folias), esfuerzo de fluencia = SMYS + 10,000 y múltiples mediciones de la corrosión para identificar el área efectiva de pérdida de metal. Las picaduras de corrosión con profundidades que exceden el 80% del espesor de la pared de la tubería o las áreas corroídas que tienen un nivel de presión de falla inferior a 1,1 veces el MAOP también se consideran críticas y deben reemplazarse o repararse de inmediato. Considerando un estándar menos conservador para el cálculo de la presión de estallido, la práctica recomendada DET NORSKE VERITAS DNV-RP-F101 [74] pretende ser utilizada en defectos de corrosión en tuberías de acero al carbono. Este método realiza la misma simplificación de perfil de tubería corroída propuesta por ASME B31G, sin embargo, supone que el perfil del defecto es rectangular. Este método es un criterio de colapso plástico solo apropiado para defectos romos en ductos de alta tenacidad. Requiere datos experimentales como entrada para el cálculo de la integridad de la tubería con la presencia de un defecto; por lo tanto, es menos conservador y más preciso que los métodos tradicionales. Las implicaciones del crecimiento continuo de defectos están fuera del alcance de este método. Esta práctica recomendada no cubre todas las situaciones que requieren una evaluación de idoneidad para el propósito, por lo que se pueden requerir métodos adicionales. Ecuaciones probabilísticas calibradas (con factores de seguridad parciales) para la determinación de la presión de funcionamiento permisible de una tubería corroída se consideran en su parte A. La presión de falla (capacidad) del defecto de corrosión se calcula en la parte B y, la presión de falla se multiplica por un único factor de uso basado en el factor de diseño original, de acuerdo con el DNV [74].

Finalmente, el método PCORRC es una práctica multifacética para evaluar la integridad de la tubería con la existencia de un defecto de corrosión. Este método simplifica el perfil corroído del defecto tal como lo hace el método ASME B31G. Calcula la presión máxima permisible con la presencia de un defecto teniendo en cuenta las propiedades mecánicas de la tubería y también es un criterio de colapso plástico que solo es apropiado para defectos romos en tuberías de alta tenacidad.

El desarrollo de proyecto conjunto de las industrias denominado Manual de Evaluación de Defectos de Tubería (PDAM) [75], el cual es un manual de evaluación completo para diferentes tipos de defectos (corrosión, abolladuras, rasgaduras, defectos de soldadura, etc.) también se utiliza en tuberías de transporte presurizadas. Este manual hace referencia a los principales métodos de evaluación disponibles para defectos específicos y los resume en un diagrama de flujo de toma de decisiones como se muestra en la tabla 5 del mismo.

Defecto	Estándar referenciado o método de evaluación
Corrosión	ASME B31G [72].
	ASME B31G modificada.
	DNV-RP-F101 [74].
	RSTRENG [73].
Rasgaduras	NG-18 ecuaciones [76].
	PAFFC (criterios de falla axial de tubería).
	BS 7910 [77].
Abolladuras	Limites empíricos.
Agrietamiento	BS 7910 [77].
	PAFFC (criterios de falla axial de tubería).
	NG-18 ecuaciones [76].
Fuga y ruptura	PAFFC (criterios de falla axial de tubería).
	NG-18 ecuaciones [76].

Tabla 1. Métodos recomendados para evaluar la resistencia al estallido. Adaptado de [78].

Estas metodologías mencionadas anteriormente solo se usan para evaluar la necesidad inminente de implementar una acción de reparación o rehabilitación en la sección de tubería afectada. Además, existen estándares que regulan y guían el uso de soluciones de rehabilitación. Estos estándares son ASME PPC2 e ISO24817 (reparaciones con materiales compuestos) que se han constituido como la referencia principal para la implementación de sistemas de rehabilitación o reparación.

ASME PCC2 proporciona indicaciones claras de la aplicabilidad de los métodos de reparación /rehabilitación para tuberías presurizadas. Es un manual completo para prevención de fallas,

reparación y extensión de vida. Muestra una tabla de selección de técnicas de rehabilitación según el tipo de defecto encontrado en la tubería, y es uno de los estándares más completos para la introducción de técnicas de rehabilitación para la industria del petróleo y gas, que incluye metodologías de diseño, fabricación y evaluación, además de, un estudio de cada una de las técnicas especificadas en el mismo.

Como un estándar complementario para la aplicación de reparaciones compuestas en la industria Oil & Gas, la norma ISO 24817 brinda referencias, orientación, diseño y protocolos de instalación, estimación de seguridad y, evaluación de tuberías para la implementación de materiales compuestos para la rehabilitación en secciones de tuberías defectuosas. Hace referencia también a otras normas ISO y ASTM para pruebas comprobar las propiedades mecánicas.

7.5. VERIFICACIÓN DE PROCESO DE REPARACIÓN/REHABILITACIÓN

Para la implementación final de los métodos de reparación/rehabilitación, existe una gran necesidad de realizar varias pruebas a corto y/o largo plazo. Estos estudios verifican el efecto de “alivio” que experimenta la tubería defectuosa en presencia de una intervención. Para este tipo de estudios, se realizan pruebas de explosión hidrostática con probetas instrumentadas, que están expuestas a un aumento progresivo de carga hasta su ruptura. Estas pruebas permiten la determinación de la presión de estallido de las secciones de tubería en presencia de un defecto estándar, por lo que dicha presión se puede comparar en tuberías con y sin una solución de reparación/rehabilitación. Las normas ASME PCC2 e ISO 24817 han regulado y clasificado la geometría y el tipo de defecto a mecanizar para estas pruebas, de forma que pueda ser rastreable y repetible. Básicamente existen dos tipos de defectos: defectos de tipo A y tipos B.

Los defectos de tipo A se encuentran contenidos en el sustrato. Estos defectos no son pasantes, y no se espera que lo sean dentro de la vida útil del sistema de reparación. Este tipo de defecto solo requiere refuerzo estructural. El diseño del método de reparación/rehabilitación para este tipo de defecto puede ser: 1) Incluir una tolerancia para el sustrato, la cual es apropiada si la contribución del sustrato debe incluirse en el cálculo de la capacidad de carga; 2) Excluir la tolerancia para el sustrato, por lo que la contribución del sustrato debe ignorarse en el cálculo de la capacidad de carga en caso de usar propiedades de materiales a corto plazo; 3) Prueba de rendimiento a largo plazo si los datos de prueba basados en el rendimiento están disponibles (pruebas de 1000 horas).

Las geometrías de las muestras con este tipo de defecto están especificadas por la literatura, con un diámetro mínimo de 100 mm (150 mm para ASME PCC2) y un posicionamiento axial que permita obtener una distancia de 3 veces el diámetro de la tubería, desde el final de la reparación hasta las tapas o límites de la probeta, como se muestra en la **Figura 6**. El ancho del defecto mecanizado (w) debe ser al menos un cuarto del diámetro de la probeta y la longitud (l) debe ser al menos la mitad de la misma. Para la reducción de la concentración de esfuerzos, se sugiere que se mecanicen radios en los bordes del defecto. El tamaño máximo de la sección mecanizada no puede ser mayor que dos veces el ancho (w) y dos veces la longitud (l). Finalmente, la profundidad del defecto debe ser de máximo el 80% del espesor máximo de la tubería.

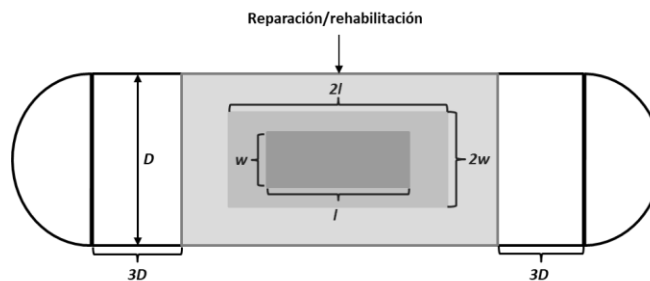


Figura 6. Diagrama de probetas de estallido para pruebas hidrostáticas.

Se realizó una revisión de una serie de 10 artículos [63] [70] [79] [80] [81] [82] [83] [84] [85] [86] en los cuales se ejecutaron pruebas de estallido para evaluar los métodos de reparación/rehabilitación. El enfoque principal de esta revisión es la comparación de la metodología implementada por los autores de los artículos, con las geometrías y protocolos establecidos de los estándares ASME PCC2 e ISO 24817.

Los documentos revisados son presentados en la **Tabla 2**. La mayoría de las investigaciones y artículos utilizan la geometría de defecto estandarizado y propuesto por las normas ISO 24817 y la ASME PCC2. El número de especímenes usados para este tipo de pruebas es el resultado de un Diseño de Experimento (DOE) implementado para el estudio de factores de interés.

Por otro lado, para los defectos de tipo B, la reparación debe diseñarse en el supuesto de que se produjo o producirá un defecto a través de la pared en el espesor restante al final de la vida útil. El sustrato de la tubería requiere un refuerzo estructural y el sellado de fugas o defectos pasantes. Se debe llevar a cabo un mínimo de nueve pruebas por solución para demostrar su robustez. El diámetro de las perforaciones varía de 10 mm, 15 mm y 20 mm.

	Tamaño axial del defecto (L)	-	Tamaño circunferencia l del defecto (W)	-	Profundida d del defecto (d)	-	Longitud total de la probeta (Length/D)	-	# de probetas
Selection of Pipe Repair Methods Gas Natural Institute [63]	1,25D	√	0,75D	√	40%	√	-	√	8
Development and qualification of a new polymeric matrix laminated composite for pipe repair [79]	-	√	-	√	-	√	-	√	-
Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system [70]	D	√	D	√	50%	√	9	√	-
Stress and Strain Analysis of Pipelines with Localized Metal Loss [80]	-	X	0,29D	√	70%	√	6,17	√	9
Advances in the repair of pipelines using composite materials [81]	0,5D	√	0,35D	√	75%	√	7,52	√	36
Comparative study for various repair methods of in-service pipeline using full scale burst test [82]	0,26D	X	0,065D	X	-	X	-	X	10
Analysis of a glass fiber reinforced polyurethane composite repair system for corroded pipelines at elevated temperatures [83]	0,98D	√	0,18D	X	70%	√	6,56	√	-
Optimization of Pipe Repair Sleeve Design [84]	0,6D	√	0,15D	X	20%	√	6	√	-

PART 7: Effectiveness of composite repairs applied to damaged pipeline [85]	0,98D	√	0,19D	X	70%	√	5,9	X	14
Failure assessments of corroded pipelines with axial defects using stress-based criteria: Numerical studies and verification analyses [86]	1,18D	√	0,39D	√	50%	√	-	-	-

Tabla 2. Revisión de literatura de defectos tipo A maquinados sobre probetas de tubería.

7.6. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

Debido al creciente uso e implementación de los materiales compuestos con fibra en la industria, la ASTM (American Society of Testing Materials) ha generado una serie de prácticas estandarizadas que permiten determinar propiedades mecánicas fundamentales para la caracterización de este tipo de materiales. En la **Tabla 3** se resumen algunas de las prácticas utilizadas para la determinación de estas propiedades:

Propiedades generales	Detalles	Normas
Esfuerzo de tensión en compuestos.	Resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, tenacidad, deformación a la falla y la relación de Poisson en las direcciones axial y circunferencial.	ASTM D3039 Propiedades de tracción de los materiales compuestos de la matriz polimérica.
	Resistencia a la tracción circunferencial y resistencia aparente.	ASTM D2290 Resistencia a la tracción circunferencial aparente del plástico o tubo de plástico reforzado.
Resistencia de unión de los compuestos.	Resistencia al corte y resistencia adhesiva interlaminada.	ASTM D3165 Propiedades de resistencia de los adhesivos en cizallamiento por carga a tracción de

		ensamblajes laminados de una sola vuelta.
Dureza en compuestos.	Dureza Barcol.	ASTM 2583 Dureza de indentación de plásticos rígidos por medio de un Barcol.
	Dureza Shore.	ASTM D2240 Propiedad de caucho - Dureza del durómetro.
Coeficiente de expansión térmica.	Coeficiente de expansión lineal térmica.	ASTM E831 Expansión lineal térmica de materiales sólidos por análisis termomecánico.
Temperatura de transición vítrea (Tg) o, temperatura de distorsión de calor (HDT).	Temperatura de transición vítrea.	ASTM E1640 Asignación de la temperatura de transición vítrea mediante análisis mecánico dinámico (DMA).
	Temperatura de transición vítrea.	ASTM D6604 Temperatura de transición vítrea de resinas de hidrocarburos por escaneo diferencial calorimétrico (DSC).
	Temperatura de distorsión.	ASTM D648 Temperatura de deflexión de plásticos bajo carga de flexión en la posición de Edgewise.
Módulo de compresión.	Módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia, deformación más allá del punto de fluencia, y esfuerzo de compresión.	ASTM D695 Propiedades a compresión de plásticos rígidos.
	Esfuerzo último de compresión, deformación última de compresión, módulo de elasticidad a compresión, y	ASTM D6641 Propiedades de compresión de materiales compuestos de matriz polimérica usando un accesorio de prueba de

razón de Poisson en compresión.	compresión de carga combinada (CLC).
------------------------------------	---

Tabla 3. Normas ASTM para la caracterización de materiales compuestos.

7.6.1. ASTM D3039 PROPIEDADES DE TRACCIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE LA MATRIZ POLIMÉRICA

La norma ASTM D3039 establece un método de prueba que permite determinar las propiedades de tracción de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados por fibras de alto módulo. Las formas de material compuesto están limitadas a fibra continua o compuestos discontinuos reforzados con fibras en los que el laminado está equilibrado y es simétrico con respecto a la dirección de prueba. La prueba básicamente toma una delgada tira plana de material que tiene sección transversal rectangular constante, la cual se monta en los agarres o mordazas de una máquina de prueba mecánica (maquina universal de ensayos) y se carga monótonamente en tensión mientras se registra la fuerza.

Este método de prueba está diseñado para conocer las propiedades de tracción para la especificación de materiales, investigación y desarrollo, garantía de calidad y diseño y análisis estructural. Por tanto, es ideal para la determinación de un modelo experimental descriptivo, que permita la predicción del comportamiento mecánico de los materiales compuestos al ser sometidos a tensión circunferencial una vez ubicados como sistemas de reparación/rehabilitación en tuberías de transporte de hidrocarburos.

Las propiedades, en la dirección de la prueba, que se pueden obtener a partir de este método incluyen las siguientes: Máxima resistencia a la tracción, deformación máxima a la tracción, módulo de elasticidad de fibra a tracción, relación de Poisson y deformación de transición. A su vez, la norma brinda una serie de parámetros de ejecución de la prueba de manera que esta pueda ser reproducible y comparable. Para la determinación de la deformación y el módulo de elasticidad de este tipo de materiales, se recomienda la implementación de un medidor de desplazamiento laser u óptico, debido a que la naturaleza frágil de la matriz polimérica curada de los compuestos hace que, al momento de su fractura, el espécimen de prueba fracture de manera estrepitosa, comprometiendo los equipos de medición mecánicos como lo son los extensómetros. En el caso de implementar extensómetros, su rango de medición debe estar

comprendido de 10mm a 50 mm, en caso de ser una prueba regular a 0° de orientación. El desplazamiento de los cabezales no puede superar los 2mm/min y una deformación estándar de 0.01 min⁻¹.

Además de lo anterior, la norma brinda sugerencias y pautas sobre la geometría de las probetas a utilizar. De acuerdo con lo especificado por la norma en la **Tabla 4**, las probetas son de carácter rectangular con sección transversal continua. Se sugiere el uso de tabs o tablillas de sujeción en caso de querer inducir la falla en la longitud calibrada. Sin embargo, estas requieren preparación adicional para el pegado de estas sobre la superficie del compuesto, lo cual, en caso de no ser controlado, puede inducir en concentradores de esfuerzo o posibles inicios de falla:

Orientación de la fibra	Ancho Mm [in]	Largo general Mm [in]	Grosor Mm [in]	Longitud de tabs Mm [in]	Grosor de tabs Mm [in]
0° Unidireccional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]
90° Unidireccional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]
Balanceada y simétrica	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	Emery cloth	-
Aleatoria - discontinua	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	Emery cloth	-

Tabla 4. Geometría recomendada de probetas de tensión. Adaptado de [87].

Finalmente, la norma ASTM D3039 brinda indicaciones sobre los típicos modos de falla encontrados en los especímenes de tensión (**Figura 7**). De esta manera, la norma brinda un código de categorización de acuerdo con el tipo de falla, el área de falla, y la localización de la misma en el cuerpo del espécimen:

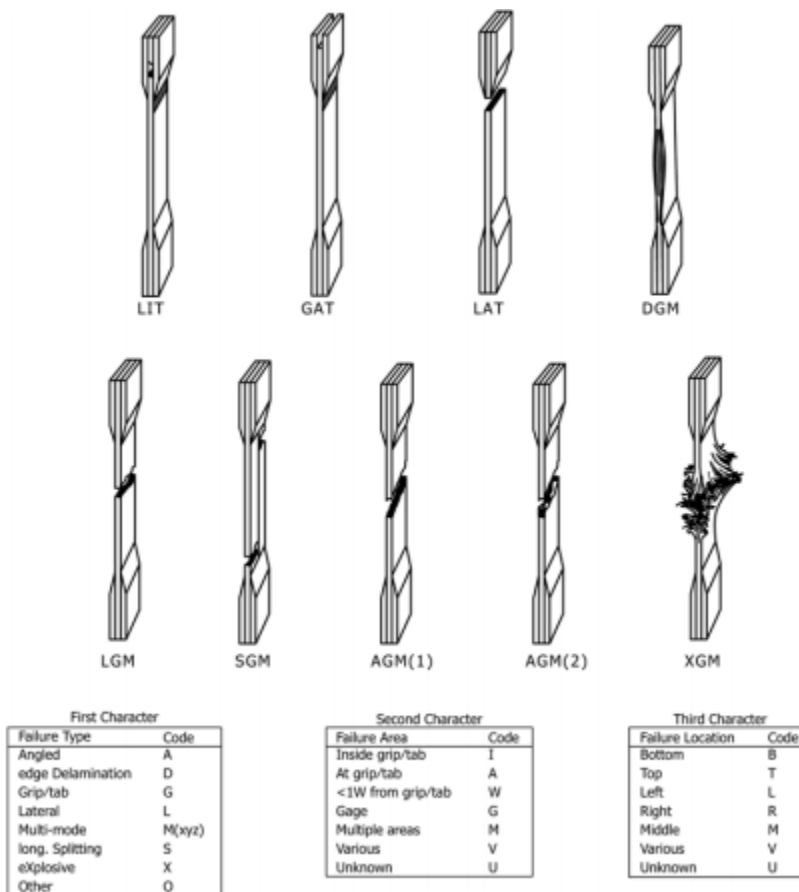


Figura 7. Modos de falla típicos y su codificación de acuerdo a la ASTM D3039. Tomado de [87].

8. SELECCIÓN DE METODOLOGÍA DE REPARACIÓN/REHABILITACIÓN

La literatura disponible ofrece una gran variedad de criterios para la selección de métodos de rehabilitación en presencia de un defecto. Una de las contribuciones más importantes, es la Tabla 1 del manual de reparación de ASME PCC2, titulada "Guía para la selección de la técnica de reparación". Esta tabla permite verificar la aplicabilidad de las técnicas de rehabilitación en presencia de defectos específicos. En la reparación/rehabilitación de tuberías de transporte de hidrocarburos, existen varios factores que pueden afectar la implementación y selección de un método sobre otro. Factores técnicos tales como la facilidad de aplicación, la extensión de la vida útil y la necesidad de mantenimiento, son de gran interés para la industria. Sin embargo, la literatura tiene limitaciones relacionadas con la verificación de la aplicabilidad de soluciones de reparación/rehabilitación en presencia de defectos específicos, la integración de los factores previamente mencionados o su interacción.

Se propone un método de selección basado en una encuesta realizada a un operador local de gas natural. Los criterios de evaluación se construyeron de acuerdo con las necesidades, la experiencia y la relevancia del criterio que el operador considera para el mantenimiento de la tubería. Los criterios incluyen: costo de implementación, versatilidad en términos de defectos, integridad en términos de extensión de vida útil, simplicidad y riesgos de implementación. A estos criterios se les asignó un peso o una significación del 30% para el criterio 1, del 20% para el criterio 2, del 30% para el criterio 3 y del 20% para el cuarto.

Se realiza una comparativa de los métodos previamente estudiados, contraponiéndolos a criterios de desempeño generales. La **Tabla 5** permite calificar el comportamiento de los métodos revisados contra parámetros técnicos generales que generalmente se requieren en la industria de Petróleo y Gas. Luego de valorar y calificar las soluciones disponibles, **Tabla 6** muestra la calificación general, obtenida por las técnicas, respecto a los criterios de evaluación contemplados en esta revisión. Las especificaciones técnicas planteadas, se alinean con los criterios sugeridos por el operador. Se evalúan de acuerdo con una evaluación numérica, obteniéndose un puntaje total promedio de cada uno de los métodos de reparación/rehabilitación respecto a dichos criterios.

Tipo de defecto	Picadura de corrosión moderada	Picadura de corrosión profunda	Rayadura local	Grieta superficial (<0.4t)	Grieta profunda (>0.4t)	Fuga	Abolladura	Corrosión interna	Anomalía cerca a soldadura
Código	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9

	Rehabilitación en servicio	Severidad del defecto	Tipos de defectos	Efectos en los alrededores	Habilidades requeridas para instalar	Tiempo de instalación
Materiales compuestos	Si	Medio	T1,T2,T3,T4,T5,T7,T8	Bajo	Bajo	Bajo
Abrazaderas mecánicas	Si	Alto	T1,T2,T3,T4,T5,T7,T8,T9	Medio	Bajo	Medio
Reemplazo de sección	No	Muy Alto	+++	+++	Muy Alto	Muy Alto
Rectificado y recubrimiento	No	Bajo	T3,T4,T7	Alto	Alto	Medio
Deposición de soldadura	No	Medio	T1,T2,T3,T6,T7,T9	Alto	Alto	Bajo
Bypass en caliente	Si	Muy Alto	T1,T2,T3,T7	+++	Muy Alto	Muy Alto
Manga tipo A	Si	Medio	T1,T3,T4,T5,T7,T8	Medio	Medio	Medio
Manga tipo B	Si	Alto	T1,T2,T3,T4,T5,T6,T7,T8	Alto	Alto	Medio

	Seguridad requerida para instalar	Vida útil esperada	Resistencia a corrosión	Manejo e implementación	Costo de implementación
Materiales compuestos	Bajo	Permanente	Alto	Alto	Bajo
Abrazaderas mecánicas	Medio	Permanente*	Bajo	Medio	Alto
Reemplazo de sección	+++	Permanente	+++	+++	Muy Alto
Rectificado y recubrimiento	Medio	Permanente*	Alto	Alto	Bajo
Deposición de soldadura	Alto	Permanente	Bajo	Alto	Bajo
Bypass en caliente	Alto	Permanente	Alto	Alto	Muy Alto
Manga tipo A	Medio	Permanente	Bajo	Bajo	Medio
Manga tipo B	Alto	Permanente	Bajo	Bajo	Medio

Tabla 5. Revisión de los métodos de reparación/rehabilitación. *: Posibilidad de convertirse en solución permanente mediante acciones adicionales. +++: No aplica.

		Materiales compuestos	Abrazaderas mecánicas	Reemplazo de sección	Rectificado y recubrimiento	Deposición de soldadura	Bypass en caliente	Manga tipo A	Manga tipo B
Bajo costo de implementación	Costo	0.8	0.4	0.2	0.8	0.6	0.2	0.6	0.6
		Bajo	Alto	Muy Alto	Bajo	Medio	Muy Alto	Medio	Medio
	Total	0.8	0.4	0.2	0.8	0.6	0.2	0.6	0.6
Versatilidad en la variedad de defectos a los que se aplica	Severidad del defecto	0.6	0.8	1	0.4	0.6	1	0.6	0.8
		Medio	Alto	Muy Alto	Bajo	Medio	Muy Alto	Medio	Alto
	Tipos de defecto	0.77	0.88	1	0.33	0.66	0.44	0.66	0.88
	Total	0.69	0.84	1.00	0.37	0.63	0.72	0.63	0.84
Aumento de la integridad en términos de extensión de la vida útil	Resistencia a la corrosión	0.8	0.4	0.6	0.8	0.4	0.8	0.4	0.4
		Alto	Bajo	+++	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Bajo
	Esperanza de vida	1	0.5	1	0.5	1	1	0.5	1
		Permanente	No permanente	Permanente	No permanente	Permanente	Permanente	No Permanente	Permanente
	Total	0.9	0.45	0.8	0.65	0.7	0.9	0.45	0.7
Simplicidad y bajo riesgo de implementación	Manejo e implementación	0.8	0.6	1	0.8	0.8	0.8	0.4	0.4
		Alto	Medio	+++	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo
	Seguridad requerida para instalar	0.8	0.6	0.2	0.6	0.4	0.4	0.6	0.4
		Bajo	Medio	+++	Medio	Alto	Alto	Medio	Alto
	Rehabilitación en servicio	1	1	0	0	0	1	1	1
		Si	Si	No	No	No	Yes	Yes	Yes
	Efectos en los alrededores	0.8	0.6	0.2	0.4	0.4	0.4	0.6	0.4
		Bajo	Medio	+++	Alto	Alto	+++	Medio	Alto
	Habilidades requeridas para instalar	0.8	0.8	0.2	0.4	0.4	0.2	0.6	0.4
		Bajo	Bajo	Muy Alto	Alto	Alto	Muy alto	Medio	Alto
	Tiempo de instalación	0.8	0.6	0.2	0.6	0.8	0.2	0.6	0.6
		Bajo	Medio	Muy Alto	Medio	Bajo	Muy alto	Medio	Medio
	Total	0.83	0.70	0.30	0.47	0.47	0.50	0.63	0.53

Tabla 6. Evaluación de alternativas. +++: No aplica.

Se llevó a cabo un Proceso de selección de Jerarquía Analítica (AHP) de forma que se pudiese encontrar la solución que mejor se adapte a las necesidades del usuario u operador de la línea, su comprensión del problema, e integrando datos técnicos y experiencia del operador en la calificación de desempeño de alternativas. Es importante seleccionar un método que cubra no solo la mayor cantidad de defectos en la tubería, sino que también sea rentable y robusto para la industria de Petróleo y Gas. Para hacerlo, se requiere hacer comparaciones pareadas y crear un modelo estructural asociado que sopesa las alternativas.

Como resultado, un gráfico que despliega y organiza las mejores alternativas, es mostrado en la **Figura 8**. Este gráfico jerarquiza las alternativas, lo que les da una calificación ponderada de la conveniencia de la aplicación en función de las necesidades del operador. La rehabilitación de manga compuesta ha sido elegida como la solución más efectiva basada en los criterios del operador, seguida por la manga o camisa tipo A.

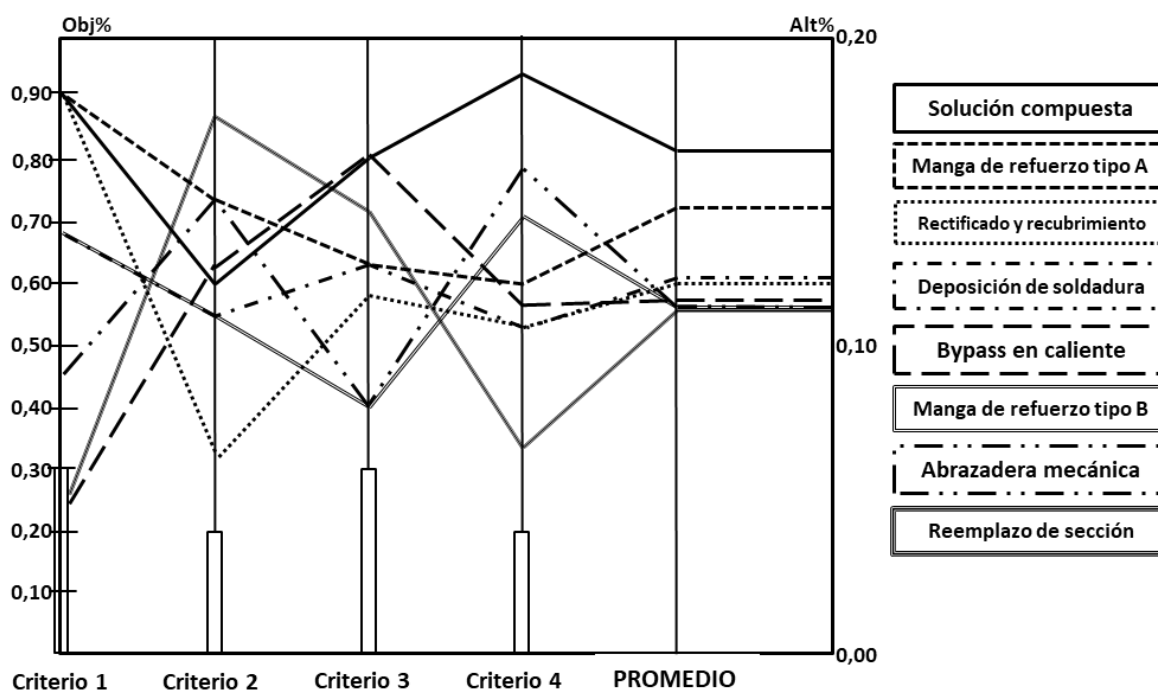


Figura 8. Valoración mediante método AHP.

Esta propuesta de selección abre la puerta a la integración de diferentes criterios de selección disponibles en la literatura tradicional, con las necesidades particulares de cada operador, teniendo en consideración las condiciones de operación o mantenimiento de la tubería, y la experiencia del operador de la línea de transporte.

9. EXPERIMENTACIÓN

9.1. MÉTODO EXPERIMENTAL

De acuerdo con la información previamente revisada y comentada en el capítulo 0, resulta de interés realizar una caracterización del comportamiento mecánico de los materiales compuestos de acuerdo diferentes parámetros de fabricación como lo son: la orientación de la fibra, el tipo de fibra y la temperatura de operación. Sin embargo, es importante resaltar que en la mayoría de las aplicaciones industriales en las cuales se implementan este tipo de materiales, la temperatura es un factor que depende variables medio ambientales las cuales no son controlables. Los conceptos y la metodología probabilística brindan solidez al estudio de estos parámetros y a su vez, se muestra como una opción novedosa para la evaluación de la confiabilidad y el desarrollo de criterios de aceptación y diseño para los materiales compuestos.

El número de muestras a fabricar se determina siguiendo un enfoque de Diseño y Análisis Estadístico de Experimentos. La finalidad de este estudio será la comprobación de la influencia de la orientación del entramado de fibra, y el tipo de fibra, como factores estadísticamente significativos en términos del impacto en la propiedad de resistencia a la tensión de los materiales compuestos. El empleo de una metodología de Diseño y Análisis Estadístico de Experimentos es importante debido a que las etapas de síntesis, deposición y caracterización pueden inducir errores experimentales significativos, y por ende resulta menester verificar por medio de herramientas estadísticas, como el Análisis de Varianza, que la variación inducida por las diferentes orientaciones de las fibras y el tipo de fibra es significativa en comparación con la variabilidad natural de los resultados.

Dependiendo del objetivo del experimento (comparación, caracterización, modelación u optimización), se cuenta con una gama de diseños experimentales posibles. En este trabajo, el principal interés se centra en estudiar el efecto de la orientación del entramado de fibra y el tipo de fibra implementado en la resistencia mecánica a la tensión de los materiales compuestos. A su vez, la posibilidad de obtener ecuaciones empíricas que permitan describir matemáticamente el comportamiento de estos materiales, integrando los factores previamente comentados. Por lo anterior, el objetivo del experimento es la caracterización y modelación, por lo cual un diseño factorial es una opción adecuada.

9.2. REACTIVOS, MATERIALES Y EQUIPOS

Reactivo	Descripción
Resina epóxica.	Referencia: R3X1080 – Parte A, Marca: 3x Engineering, Composición: BPA-Epiclorhidrina PM > 700.
Catalizador.	Referencia: R3X1080 – Parte B, Marca: 3x Engineering, Composición: Aminas cicloalifáticas (Isoforona diamina).

Tabla 7. Lista de reactivos implementados.

Equipo	Imagen
--------	--------

Máquina universal de ensayos MTS modelo 793.10.



Controlador de temperatura.



Brazos mecánicos de radiación de calor por
resistencia eléctrica.



Caladora 550W 0-3100Cpm Vv 3/4
Pulgadas.



Pulidora 4 1/2 Pulgadas 800W 10000 Rpm
Ref G720.



Cizalladora de banco.



Calibrador Pie de Rey Mitutoyo.




Taladro Percutor 1/2 Pulgada 940W 7.8A
2700Rpm Vvr Ref DW505.



Balanza OHAUS adventurer pro de precision
(51g a 8100g).



Tabla 8. Lista de equipos utilizados.

Materiales	Imagen
Manto de fibra de vidrio volan (232 g/m ²).	

Manto de fibra de carbono de (200 g/m²).



Manto de fibra de aramida (Kevlar) de (180 g/m²).



Rodillo extractor de burbujas de aire de mortero.



Brocha Popular Mona 3 Pulgadas.



Espátula Mediana Plástica



Disco diamantado continuo 4-1/2 pulgada.



Hojas caladora hss t118a.



Mezclador de mortero In-house.



Tabla 9. Lista de materiales implementados en la experimentación.

10. FABRICACIÓN

En este trabajo se propone experimentar con parámetros fundamentales en la fabricación y aplicación de materiales compuestos como método de reparación/rehabilitación a tuberías de transporte de hidrocarburos. En el procedimiento planteado, el material compuesto se construye con la disposición de lonas o láminas de fibra, cubiertas con resina distribuida de manera uniforme. Las capas subsiguientes son agregadas conforme se impregna completamente cada capa inmediatamente anterior.

10.1. SELECCIÓN DE PARAMETROS EXPERIMENTALES

Previo a la descripción detallada del proceso de fabricación de los materiales compuestos, se justifica la escogencia de los parámetros o factores de estudio en base a los posibles factores que afectan la calidad y propiedades mecánicas de este tipo de materiales, como se observa en la **Figura 9**, los cuales son resultado de revisiones bibliográficas e investigaciones experimentales pasadas:



Figura 9. Diagrama de factores que afectan la capacidad mecánica de los materiales compuestos.

10.1.1. RESISTENCIA DE LA RESINA

Los materiales compuestos son una combinación entre la integración de una matriz polimérica y fibras poliméricas. La matriz rodea las fibras y, por lo tanto, las protege contra ataques químicos y ambientales. Para que las fibras transporten carga de manera adecuada, la matriz debe tener un módulo más bajo y un mayor alargamiento que el refuerzo fibroso. La literatura reporta el uso de distintos tipos de resina en la fabricación de materiales compuestos como lo son las termoplásticas (fenólicas, poliésteres, vinil esteres, epóxicas, Ésteres de cianato, Bismaleimida (BMI) y poliimida, y Poliuretano); y las termo estables (Nylons, Polipropileno (PP), Polietereetercetona (PEEK), y Sulfuro de polifenileno (PPS)) [88][89].

Las resinas poseen distintos tipos de propiedades y aplicaciones entre sí. La selección de matriz se realiza en función de los requisitos químicos, térmicos, eléctricos, de inflamabilidad, ambientales, de costo, de rendimiento y de fabricación que tenga el compuesto. La matriz determina la temperatura de operación del servicio de un compuesto, así como los parámetros de procesamiento para la fabricación de piezas [89].

Los resinas o matrices termoestables son de naturaleza frágil y generalmente se usan con alguna forma de relleno y refuerzo. Proporcionan una fácil procesabilidad y una mejor impregnación de la fibra debido a que la resina líquida se utiliza a temperatura ambiente para diversos procesos como el devanado de filamentos, la extrusión por pulsos y el RTM. Los termoestables ofrecen mayor estabilidad térmica y dimensional, mejor rigidez y mayor resistencia eléctrica, química y de solventes. Los materiales de resina más comunes utilizados en compuestos termoestables son epoxi, poliéster, viniléster, entre otros. Algunas de las propiedades mecánicas de las mismas son mostradas en la **Tabla 10** [90]:

Resina	Módulo de tensión (GPa)	Esfuerzo de tensión (MPa)
Epóxica	2.5-5.0	50-110
Fenólica	2.7-4.1	35-60
Polyester	1.6-4.1	35-95

Tabla 10. Propiedades mecánicas típicas de resinas termoestables. Adaptado de [88].

Las matrices epoxy son un sistema de resina muy versátil, que permite una amplia gama de propiedades y capacidades de procesamiento. Presenta baja contracción y una excelente adhesión a una variedad de materiales de sustrato. Como principal ventaja, está la fácil manipulación de su composición química para la mejora de propiedades, fácil mezcla con otros epóxicos para lograr propiedades requeridas, entre otras ventajas.

Los materiales termoplásticos son, en general, dúctiles y más duros que los materiales termoestables y se utilizan para una amplia variedad de aplicaciones no estructurales sin rellenos y refuerzos. Los termoplásticos pueden fundirse por calentamiento y solidificarse por enfriamiento, lo que los hace capaces de remodelar y reformar repetidamente. Sin embargo, presentan una notable debilidad al funcionamiento en condiciones de temperatura elevadas o variables.

En base a lo anterior, y con el interés de experimentar la resistencia de los materiales compuestos ante efectos térmicos, la resina seleccionada fue la epóxica debido a su gran capacidad mecánica, fácil adaptación a los requerimientos de trabajo, facilidad de adquisición y capacidad térmica.

10.1.2. TEMPERATURA DE OPERACIÓN

La temperatura de operación es un factor fundamental en el desempeño de materiales compuestos con matriz polimérica. Sean termoestables o termoplásticos, las resinas tienen temperaturas límites de operación previo a que el compuesto sufra degradación y pérdida de propiedades mecánicas.

Debido a que los sistemas de tuberías de transporte de hidrocarburos se encuentran expuestos a condiciones medioambientales variables, es una tarea compleja la definición de un rango de temperaturas en las cuales estos activos usualmente operan. En base a la información revisada y consultada en la literatura, y a su vez, a la información provista por un operador local de transporte de gas natural, se pudo determinar que la temperatura crítica de bombeo del hidrocarburo, luego de una estación compresora, puede llegar a un máximo de 60 °C.

Se define esta temperatura como la más crítica para el desempeño de un sistema de reparación/rehabilitación, por tanto, la experimentación se realiza con esta temperatura como estándar. Posterior a las pruebas de verificación de efecto e incidencia estadística de los factores experimentales en el desempeño mecánico de los materiales compuestos, se propone la realización de pruebas de sensibilidad que permitan determinar el efecto de la temperatura sobre el comportamiento general del compuesto desde 0 °C a 150 °C con la fibra que demuestre un mejor comportamiento mecánico.

10.1.3. DISTRIBUCIÓN UNIFORME DE LA MATRIZ SOBRE LAS FIBRAS

La presencia de impurezas, desperfectos, burbujas de aire, vacíos o zonas sin impregnar, generan puntos débiles en la conformación del compuesto. Estos puntos son concentradores, los cuales generan la falla del sistema una vez es sometido a carga.

Comercialmente, existen distintos métodos de fabricación de materiales compuestos con matrices termoestables que permiten el control y la eliminación de desperfectos en el producto final. Entre estos se encuentran el proceso de armado preimpregnado, proceso de pulverización, proceso de devanado de filamentos, proceso de Pultrusión, proceso de moldeo por transferencia de resina, proceso de moldeo por inyección de reacción estructural (SRIM), proceso de moldeo por compresión, proceso de envoltura del rollo, y el moldeo por inyección de compuestos termoestables.

Uno de los más implementados comercialmente en la industria naval es el armado por preimpregnado [91]. También conocido como proceso de autoclave o proceso de embolsado al vacío. Formas complicadas con altas fracciones de volumen de fibra se pueden fabricar utilizando este proceso. En este proceso, los preimpregnados se cortan, se colocan en la orientación de fibra deseada, y luego se empacan al vacío. Después del embolsado al vacío, el compuesto con el molde se coloca dentro de un horno o autoclave y luego se aplica calor y presión para el curado y la consolidación de la pieza final [88]. Sin embargo, este proceso es altamente complejo por el requerimiento de horneado para el curado de los compuestos.

Por su parte, el proceso implementado fue el proceso de impregnación manual. En este proceso, se aplica resina líquida sobre una capa del refuerzo. Se usa un rodillo para impregnar la fibra

con la resina. Se aplica otra capa de resina y refuerzo hasta que se acumula un espesor adecuado. Es un proceso muy flexible que permite al usuario optimizar la pieza mediante la colocación de diferentes tipos de materiales de tela y estera. Este proceso requiere experticia por parte del usuario ya que está abierto a errores de fabricación e impregnación. Sin embargo, es el más económico y sencillo de implementar. El proceso utilizado para cada tipo de fibra fue el mismo, tratando de garantizar homogeneidad en el proceso, como a su vez, en los errores de fabricación.

10.1.4. TIPO DE FIBRA IMPLEMENTADA

Como se comentó previamente, los materiales compuestos implementados en los sistemas de reparación/rehabilitación de tuberías de transporte de hidrocarburos suelen estar integrados por tres diferentes tipos de fibras (vidrio, carbono y aramida). El desempeño mecánico de los distintos tipos de fibra ha sido ampliamente estudiado, sin embargo, su validación estadística no ha sido representada en los estudios realizados a las mismas. Resulta de vital interés la validación del efecto de los distintos tipos de fibra, sobre la resistencia a la tensión del material compuesto. Es por tal motivo que se adquirieron y ensayaron estos tres tipos de fibras usualmente utilizadas por la industria para la generación de sistemas de reparación/rehabilitación de tuberías de transporte de hidrocarburos.

A su vez, la capacidad de poder extraer una ecuación empírica derivada de la experimentación que permita predecir el comportamiento de los materiales compuestos de acuerdo con el tipo de fibra del cual están compuestos, es un aporte al actual estado del arte de este tipo de sistemas de reparación/rehabilitación.

10.1.5. ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS

Al igual que el tipo de fibra, la orientación de las fibras en la disposición final del material compuesto el cual es sometido a diferentes orientaciones de cargas, ha sido ampliamente estudiado. Sin embargo, no se ha realizado una validación estadística que demuestre con certeza el efecto que posee este factor respecto a la resistencia a la tensión de este tipo de materiales.

Resulta de interés el desarrollo de una ecuación empírica que no solo integre la predicción del comportamiento mecánico de los materiales compuestos ante distintos tipos de fibra, sino que, además, pueda predecir el comportamiento con diferentes tipos de orientación de fibra.

Debido a la difícil adquisición de fibras unidireccionales en el mercado local, el presente estudio fue realizado con mantos entretejidos (bidireccionales) o conocidos comercialmente como woven. Por ser bidireccionales, las orientaciones permisibles para estudio comprenden de 0 a 45°.

10.1.6. NÚMERO DE CAPAS

El número de capas es una variable que afecta directamente el comportamiento a tensión de este tipo de materiales, debido a que esto traduce el área transversal la cual será sometida a tensión en la eventualidad de un incremento de presión en la tubería que posea el sistema de reparación/rehabilitación de material compuesto.

Podría entenderse que, a mayor número de capas, mayor resistencia, sin embargo, la normativa existente provee indicaciones y ecuaciones prácticas para el cálculo del número de capas requerido para una reparación, teniendo en cuenta el espesor de tubería comprometido y la presión de operación de la línea, de forma que no se generen sobre costos y la reparación pueda restituir los valores operacionales regulares. De acuerdo con esto, resulta innecesario incluir este factor dentro de la experimentación.

A su vez, la normativa referente al ensayo de tensión en materiales compuestos (ASTM D3039) brinda una guía clara y específica sobre las dimensiones de las probetas de ensayos, lo cual comprende un espesor estándar. Por consiguiente, se utilizó el mismo número de capas para la fabricación de probetas de los diferentes tipos de fibra (9), puesto que, entre los mantos de fibra utilizados, existía una similitud en el gramaje de estos.

10.2. PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN

La fabricación de material compuesto fue realizada de manera manual teniendo en consideración el diseño experimental realizado para la posterior verificación del efecto de la orientación y el tipo de fibra sobre la resistencia mecánica a tensión de estos materiales.

El montaje experimental planteado fue un diseño 3^2 con una réplica, considerando como factores de efectos fijos, la orientación de la fibra y el tipo de fibra. Los niveles dispuestos para la experimentación fueron escogidos de acuerdo con los límites operacionales permisibles de la fibra bidireccional y a su vez, brindasen una descripción completa de la superficie de respuesta de los compuestos. Los niveles del factor orientación de la fibra fueron 0° , 22.5° y 45° en tejidos bidireccionales para fibra de vidrio, fibra de carbono y aramida. La temperatura operacional durante la primera fase de testeo fue la establecida como crítica en la sección **10.1.2**, de 60°C .

El anterior DoE deriva en la producción de 18 probetas para la primera fase experimental y la elaboración de 5 probetas adicionales para el estudio de sensibilidad térmica del compuesto que, respecto a los resultados obtenidos en la primera fase, demuestre ser el tipo de fibra y la orientación más resistente.

Teniendo en consideración el requerimiento del número de probetas a extraer de cada tipo de fibra, se enuncia el proceso de manufactura de láminas de material compuesto:

- **Paso 1:** Se dispone la generación de placas rectangulares de compuesto de dimensiones generales de 50 cm x 90 cm, con un espesor mínimo de 2.5 mm. Para ello, se cortan las secciones de rollos de fibra de 3 m x 1 m. El corte de fibra de aramida resultó complejo por la alta dureza de la fibra misma. Ante este panorama, la preparación de probetas experimentales individuales con orientaciones diferentes en mantos bidireccionales resulta impráctica por la naturaleza del tejido de mantener su integridad, al encontrarse entrelazadas las fibras. Al momento de realizar algún corte, la sección resultante tiende a desenlazar el entramado y, por ende, perder su configuración de manto.
- **Paso 2:** Una vez dispuestas las nueve capas de cada uno de los tipos de fibra, se prepara la mezcla de resina-catalizador. Para ello se dispusieron 4 recipientes iguales en los cuales se vertieron proporciones específicas de la mezcla de acuerdo con la **Tabla**

11. Los recipientes fueron masados y el vertido de la resina fue realizado de acuerdo a la relación (Part A : Part B) = 4.66 : 1. La aplicación de la mezcla tuvo un carácter progresivo debido a la elevada velocidad de reacción de la resina con los altos niveles de humedad que posee la costa caribe Colombiana (>50% de humedad relativa).

Orden de fabricación	Recipiente	Peso total (g)	Peso en resina (g)	Peso en catalizador (g)
1	III	394.5	207.8	44.57
2	IV	641.9	411.65	88.35
3	II	840.6	576.31	123.69
4	I	1000	823.52	176.47

Tabla 11. Orden y proporciones de fabricación de mezcla resina-catalizador.



Figura 10. Recipientes de mezclado.

- **Paso 3:** Una vez vertida la resina en cada recipiente, se agrega de manera secuencial la cantidad de catalizador correspondiente. El catalizador es posteriormente mezclado utilizando un taladro y un mezclador de mortero in-house.



Figura 11. Taladro con accesorio de mezcla de mortero.

- **Paso 4:** Una vez homogeneizada la mezcla, se vierte sobre las láminas cortadas de fibra, las cuales se dispusieron sobre superficies lisas y limpias. La distribución de la mezcla resina-catalizador sobre la fibra se realiza mediante el uso de una espátula plástica.



Figura 12. Aplicación de mezcla resina-catalizador sobre secciones de fibra.

- **Paso 5:** Se garantiza la impregnación total de mezcla sobre la fibra aplicado con la brocha resina-catalizador en secciones poco humedecidas.

- **Paso 6:** Una vez cubierta la fibra con la mezcla, se procede con la eliminación de burbujas derivadas del proceso de apilado de secciones o láminas de fibra sobre la otra. Para ello se utiliza un rodillo de mortero acanalado, que garantiza la aplicación homogénea de mezcla sobre la fibra. El paso del rodillo fue realizado de manera bidireccional.

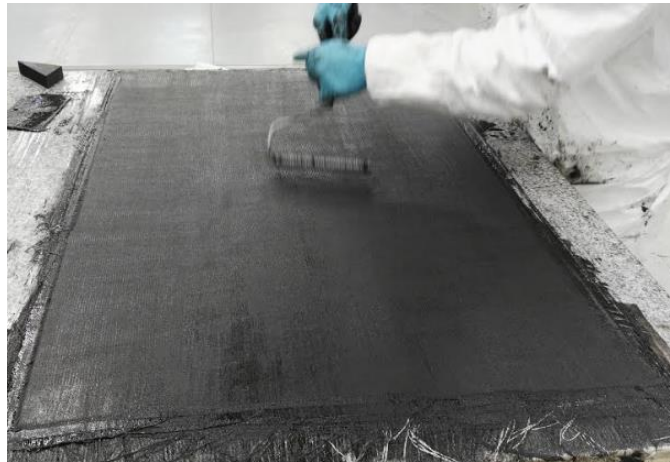


Figura 13. Rodillo de mortero con canales para homogeneización de vertido de mezcla resina-catalizados, y extracción de burbujas.

- **Paso 7:** Apilado de las 9 capas de fibra y posterior curado de esta (5 días a temperatura y humedad controladas).
- **Paso 8:** Distribución y marcación según orientación, tipo de fibra y dimensiones especificadas en la norma ASTM D3039 sobre placas de material compuesto.

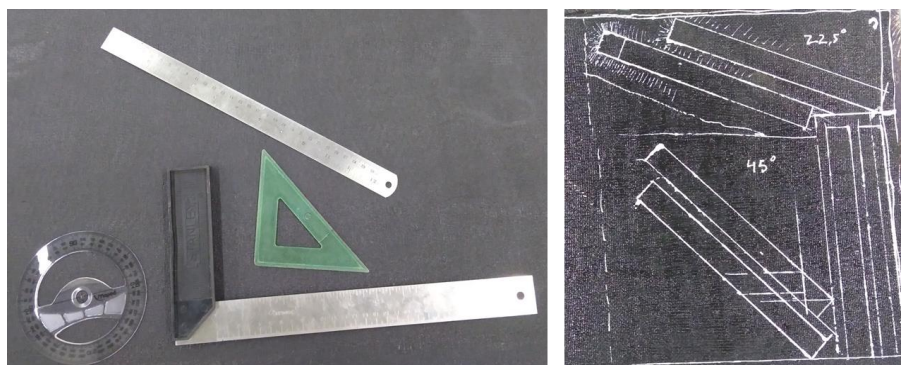


Figura 14. Distribución y marcación de probetas de tensión según orientación y tipo de material.

- **Paso 9:** Corte de probetas de placas de material compuesto en base a marcación realizada en paso previo. La extracción de estas probetas presentó grandes retos para la obtención de especímenes de ensayo con dimensiones, tolerancias y orientaciones específicas, debido al calentamiento por fricción de la resina, impregnación de la misma a las herramientas de corte y dureza de las fibras al corte. Las probetas de aramida requirieron el uso de un disco diamantado de pulidora para su extracción. Las probetas de carbono y vidrio fueron extraídas utilizando una caladora convencional.
- **Paso 10:** Se enumeran las probetas extraídas de las placas de compuesto respecto al orden de experimentación obtenido por un software de aleatorización de forma que no se induzca sesgo alguno en el procedimiento de análisis. En la **Tabla 12** se muestra el orden de experimentación en variable natural.

Replica	#orden	Orientación	Tipo de fibra
1	1	45	Carbono
1	2	0	Vidrio
1	3	45	Vidrio
1	4	22.5	Vidrio
1	5	0	Carbono
1	6	22.5	Aramida
1	7	45	Aramida
1	8	22.5	Carbono
1	9	0	Aramida
2	10	45	Carbono
2	11	0	Vidrio
2	12	45	Vidrio
2	13	22.5	Vidrio
2	14	0	Carbono
2	15	22.5	Aramida
2	16	45	Aramida
2	17	22.5	Carbono
2	18	0	Aramida

Tabla 12. Orden de ejecución experimental.



Figura 15. Probetas de tensión.

- **Paso 11:** Se analizan la información obtenida, para mediante un análisis de varianza (ANOVA), determinar la significancia de los efectos de los factores experimentales.
- **Paso 12:** Distribuir y marcar las probetas de la fase dos de experimentación en las secciones remanentes de material compuesto de acuerdo con la orientación y tipo de fibra más resistente respecto al ANOVA del paso anterior.



Figura 16. Probetas de segunda fase experimental.

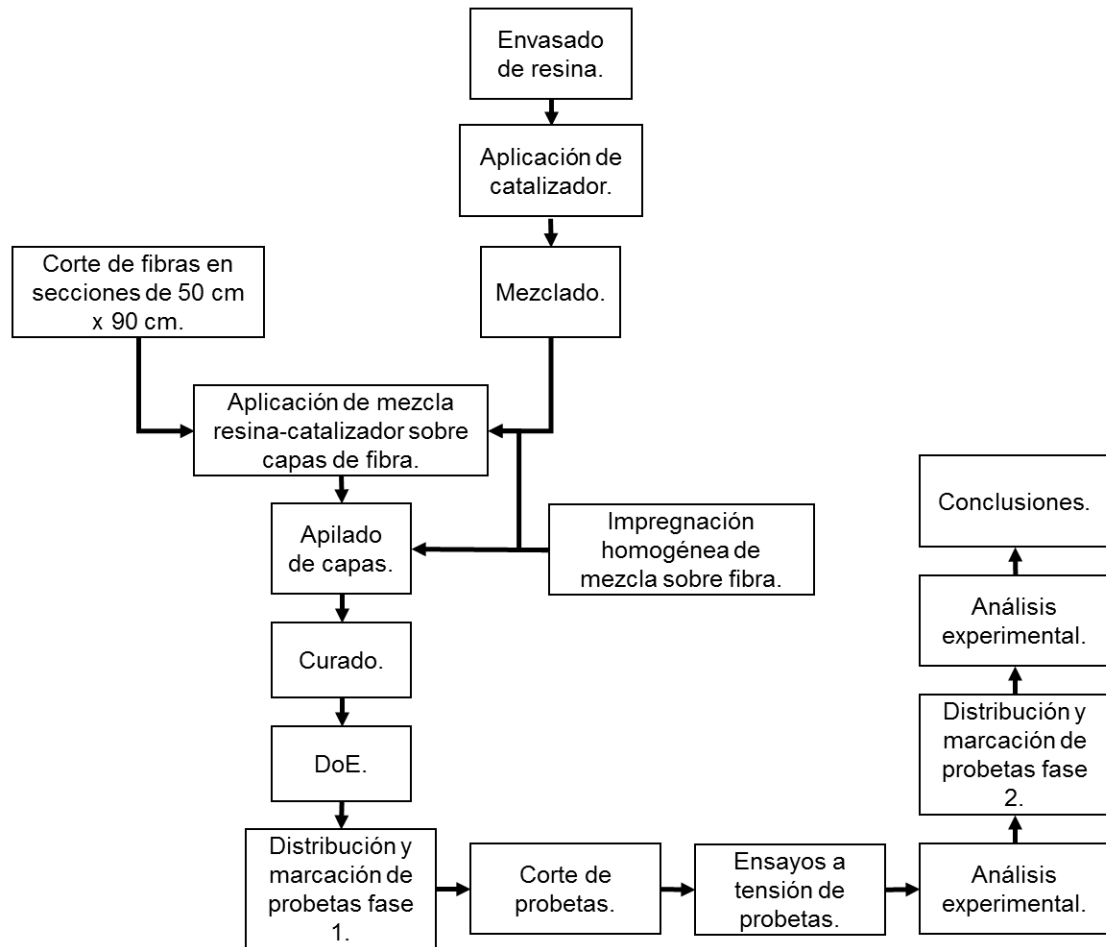


Figura 17. Esquema de proceso experimental.

11. CARACTERIZACIÓN

11.1. ENSAYO DE Tensión

Los ensayos de tensión fueron realizados en una máquina universal de ensayos MTS modelo 793.10. Fue programada para un desplazamiento de cabezales equivalente a 2 mm por minuto. Se realizó a su vez, el montaje de un sistema in-house de calentamiento por radiación, el cual posee un sistema de control de lazo cerrado mediante medición de temperatura superficial por termocupla. En el centro del encerramiento generado por los brazos de calor, se ubica la probeta sostenida por las mordazas de la máquina, tal como se observa en **Figura 18**.

La temperatura se mantiene constante en la superficie de la probeta hasta que ocurre la falla.



Figura 18. Montaje de pruebas de tensión.

12. ANÁLISIS DE RESULTADOS

12.1. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE VARIANZA

De acuerdo con el orden aleatorizado brindado anteriormente, se registran los datos de esfuerzos últimos a tensión obtenidos en la máquina de fatiga con carga monotónica MTS. Se muestra en la **Tabla 13** la codificación de variable natural vs variable codificada para su análisis estadístico. Los resultados de esfuerzo se muestran a continuación en la **Tabla 14**.

Fuente de variación	Variable natural	Variable codificada
Orientación	0°	-1
	22.5°	0
	45°	1
Tipo de fibra	Vidrio	-1
	Carbono	0
	Aramida	1

Tabla 13. Convención entre variables de estudio naturales vs codificadas.

Replica	#orden	Orientación	Tipo de fibra	Esfuerzo a tensión (PSI)
1	1	1	0	4382.685
1	2	-1	-1	13242.743
1	3	1	-1	4590.228
1	4	0	-1	5981.145
1	5	-1	0	48014.834
1	6	0	1	19978.036
1	7	1	1	17618.116
1	8	0	0	12751.486
1	9	-1	1	52624.42
2	10	1	0	8037.961
2	11	-1	-1	18427.490
2	12	1	-1	8146.504
2	13	0	-1	5757.175

2	14	-1	0	41404.850
2	15	0	1	27419.210
2	16	1	1	18353.915
2	17	0	0	13419.594
2	18	-1	1	40856.112

Tabla 14. Resultados experimentales en variable codificada.

Los datos son ingresados a un software de análisis de datos estadísticos (STATGRAPHICS) para la verificación de varianzas. Del análisis de varianza derivado de los resultados obtenidos, se tiene que existe un efecto significativo de la orientación de la fibra sobre la resistencia mecánica a la tensión, así como también, el tipo de fibra implementado en el sistema compuesto. La **Tabla 15** muestra que es preciso prestar atención tanto a la orientación de la fibra al momento de realizar el montaje de los sistemas de reparación/rehabilitación de tuberías de transporte de hidrocarburos, como también el tipo de fibra utilizado para este tipo de aplicaciones y la interacción entre ambos factores. Se requiere determinar, por tanto, cual es la orientación con mejor desempeño y cuál es el mejor tipo de fibra, sin embargo, es requerido realizar la verificación de supuestos que permiten validar la independencia de los factores experimentales, que existe una variabilidad homogénea entre los niveles de cada factor evitando así el sesgo, y que los datos siguen un comportamiento normal, estadísticamente hablando.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Fo	Valor P
EFECTOS					
PRINCIPALES					
A: Orientación	2.26877E9	2	1.13438E9	70.05	0.0000
B: Tipo de fibra	1.22886E9	2	6.14431E8	37.94	0.0000
INTERACCIONES					
AB	4.70649E8	4	1.17662E8	7.27	0.0067
RESIDUAL	1.45742E8	9	1.61935E7		
TOTAL	4.11402E9	17			

Tabla 15. ANOVA resultante de primera fase de experimentación.

12.1.1. VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS

Se realiza la verificación de supuestos estadísticos que brindan validez al análisis de varianza.

Estos se muestran en las **Figura 19**, **Figura 20**, **Figura 21** y **Figura 22**:

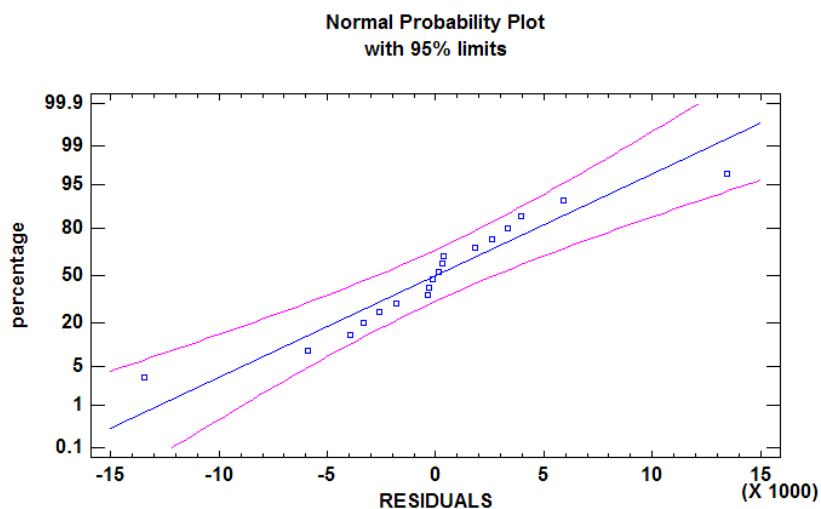


Figura 19. Gráfico de probabilidad normal de los residuos.

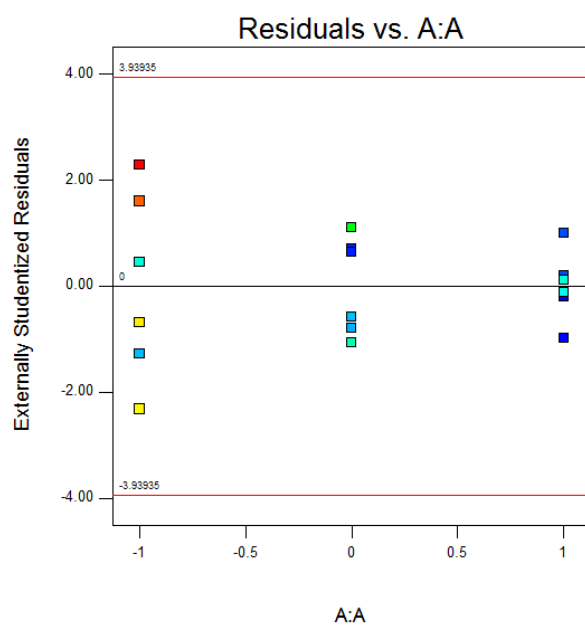


Figura 20. Gráfico de homocedasticidad de factor orientación.

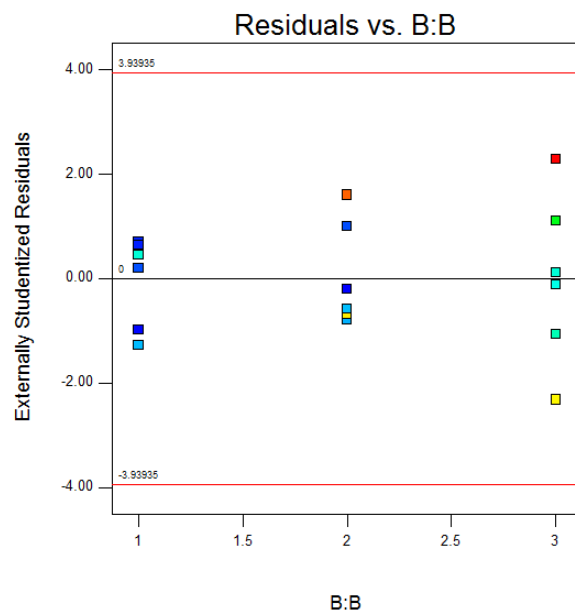


Figura 21. Gráfico de homocedasticidad de factor tipo de fibra.

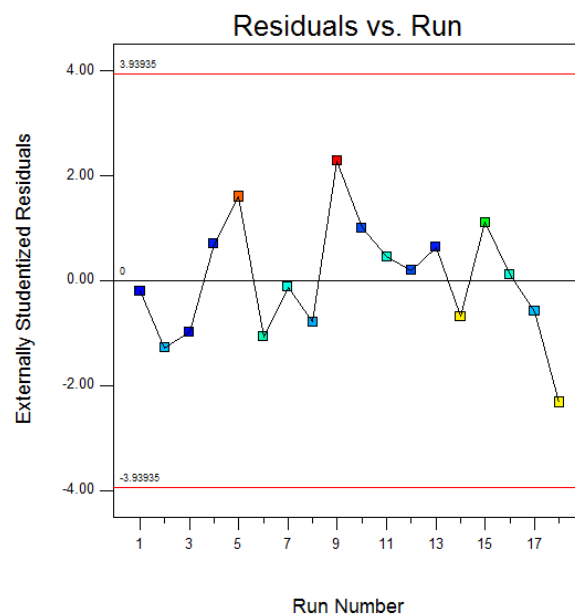


Figura 22. Verificación de independencia de los residuales del experimento.

De los gráficos de estudio de residuales del experimento, se observa que se cumplen a cabalidad los supuestos estadísticos de normalidad, homocedasticidad e independencia, por tanto, se valida el análisis de varianza realizado.

12.1.2. DEFINICIÓN DE NIVELES ÓPTIMOS DE RESISTENCIA

Una vez validado el ANOVA, se desglosa el estudio del efecto de los factores fijos sobre el comportamiento mecánico del material compuesto ante esfuerzos de tensión. Por medio de un Test de Diferencia Mínima Significativa (LSD de Fisher) se puede obtener cuál de los niveles especificados para el factor cuantitativo (orientación) y cualitativo (tipo de fibra) ofrece un mejor desempeño estadístico sobre la resistencia mecánica del material. De acuerdo con la **Tabla 16** se observa que la orientación 0° ofrece un mejor desempeño de la resistencia mecánica. Con respecto al tipo de fibra, el nivel alto del factor, es decir, el Kevlar, resulta ser el más resistente:

	Levels	Count	LS Mean	LS Sigma	Homogeneous Groups
Orientación	1	6	10188.2	1642.84	X
	0	6	14217.8	1642.84	X
	-1	6	35761.7	1642.84	X
Tipo de fibra	-1	6	9357.55	1642.84	X
	0	6	21335.2	1642.84	X
	1	6	29475.0	1642.84	X

Tabla 16. Prueba de diferencia mínima significativa LSD con factores codificados.

Este análisis puede ser complementado analizando la **Figura 23** de interacciones entre los factores experimentales. Se puede observar que, aunque el desempeño de la fibra de carbono y aramida es muy similar cuando la orientación de la fibra es 0°, el comportamiento general de la aramida es superior en cualquiera de los niveles restantes de orientación. Por tanto, se propone continuar el análisis de sensibilidad térmico con dicha fibra.

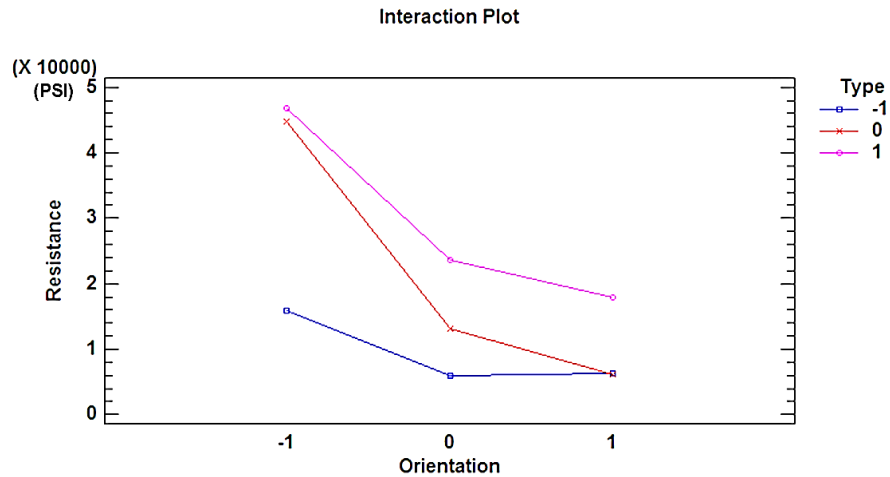


Figura 23. Gráfico de interacciones de factores experimentales.

12.2. SENSIBILIDAD TÉRMICA DEL COMPUESTO DE ARAMIDA

Se una segunda fase experimental de sensibilidad térmica sobre el compuesto más resistente, el cual es la aramida, de forma que se pueda determinar el efecto de la temperatura sobre su capacidad y resistencia mecánica. Es importante resaltar que el material compuesto es una combinación de propiedades mecánicas tanto de la fibra, como de la matriz polimérica, que en este caso es Epóxica.

Se realizaron 5 pruebas adicionales, con orientación de 0° a temperaturas de 30 °C, 60 °C, 90 °C, 120 °C y 150 °C, como se puede observar en la **Figura 24**:

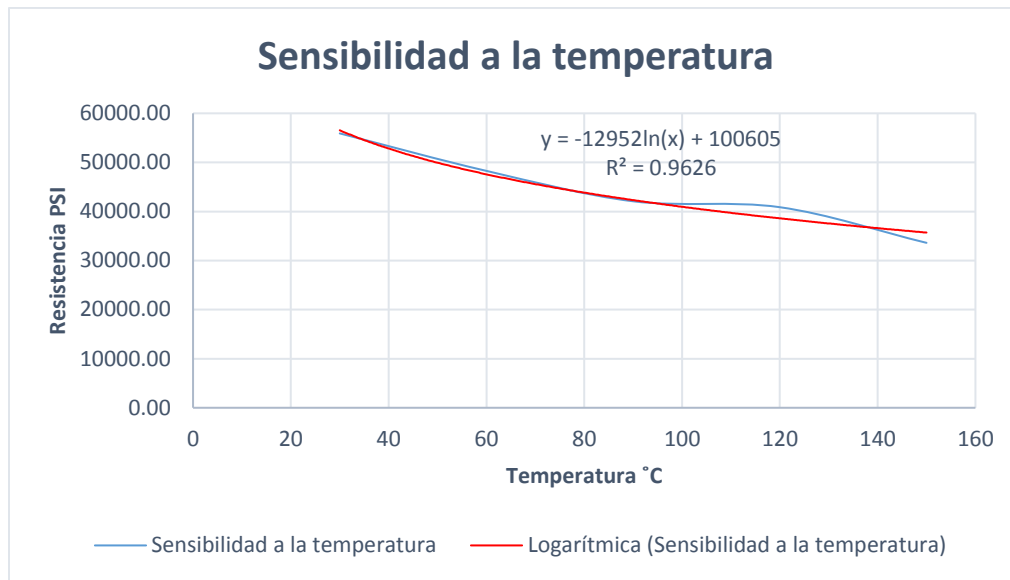


Figura 24. Comportamiento mecánico de la fibra de aramida ante variación de temperatura.

El comportamiento matemático de la resistencia respecto a la variación de temperatura presenta un comportamiento de carácter asintótico. Por tanto, el modelo más aproximado a esta descripción es un modelo exponencial. De la **Ecuación 1** se obtiene que la resistencia mecánica a tensión de los compuestos disminuye a medida que la temperatura aumenta:

$$\text{Resistencia} = -12952 \ln(T) + 100605$$

Ecuación 1

Donde “*T*” hace referencia a la temperatura. De la temperatura ambiente encontrada en el caribe colombiano, la cual es de alrededor de 30 °C, hasta los 150 °C, la resistencia decayó un alrededor de un 40%. Hasta los 90 °C hay una disminución de alrededor del 25% de las propiedades a tensión del material compuesto, considerando su máximo desempeño con un valor de 385 MPa.

12.3. MODELOS EXPERIMENTALES

Una vez validado el ANOVA, se procede a la generación de modelos de regresión que describan el comportamiento de la resistencia a tensión de los materiales compuestos, respecto a los factores de estudio que son la orientación y el tipo de fibra utilizada en el compuesto. Previa a

la elaboración del modelo matemático descriptivo, se realiza una verificación de la correlación existente entre las variables de entrada contra la variable de salida, de manera que pueda conocerse si dichos factores poseen incidencia sobre la variable de respuesta y/o algún tipo de dependencia entre los mismos:

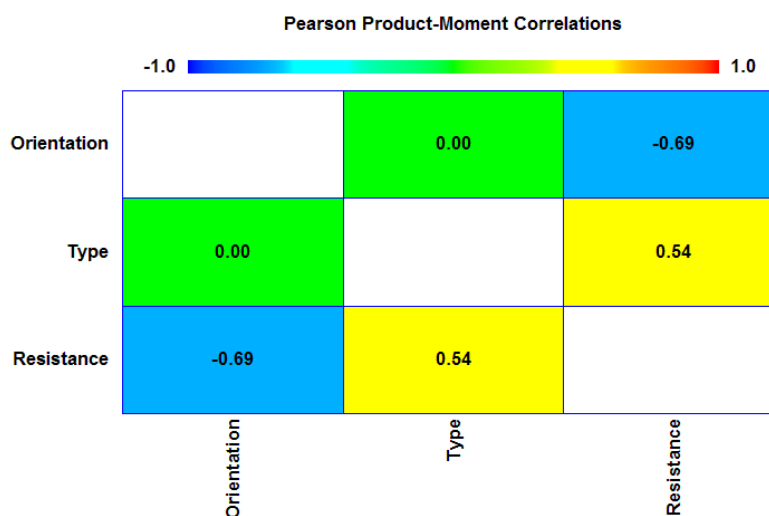


Figura 25. Gráfico de correlaciones entre factores de entrada y salida.

La correlación entre factores de entrada es nula, por tal motivo, no existe una redundancia del comportamiento de una variable con respecto a la otra. Por otro lado, la correlación que existe entre los factores de entrada con respecto a la variable de respuesta es alta y posee una relación inversa. Esto soporta lo determinado por el análisis de varianza previamente descrito.

Se procede con la determinación de los modelos matemáticos que describan el comportamiento experimental de la orientación y el tipo de fibra con respecto a la resistencia ultima a la tensión obtenida de acuerdo a lo mostrado en la **Figura 26**. Es necesario el planteamiento de 3 modelos diferentes para cada tipo de fibra, por ser un factor cualitativo.

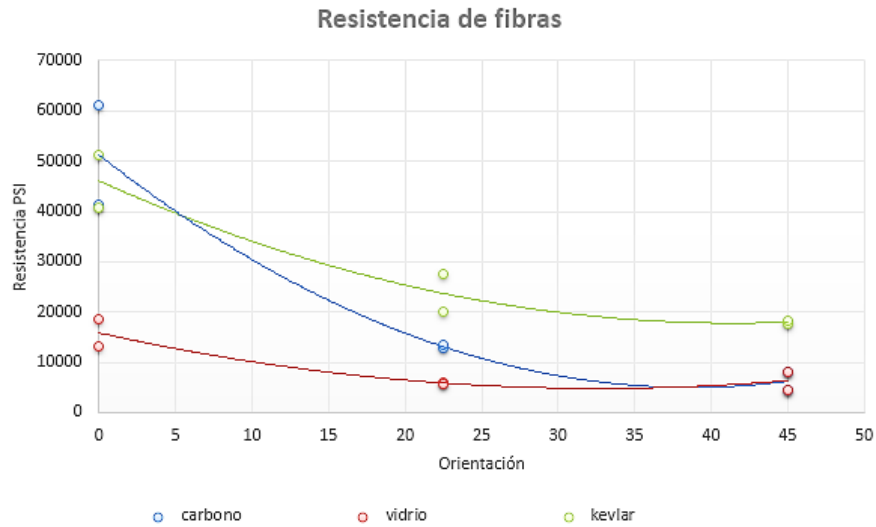


Figura 26. Diagrama de resistencias de fibras de material compuesto.

12.3.1. MODELO DE FIBRA DE VIDRIO

El modelo formulado para la fibra de vidrio tiene en consideración el comportamiento de los datos variando la orientación de la fibra como es mostrado en la **Figura 26**. La resistencia descende con el aumento del ángulo de orientación de la fibra bidireccional. Se entiende que la resistencia nunca llega a ser cero, por tanto, puede interpretarse que el comportamiento es asintótico en un eje paralelo al “X”. A partir de lo anterior se propone el siguiente modelo descrito en variable natural:

$$Resist = 6118.76 - 9716.35 * \left(-\frac{1}{e^O} \right) \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde “O” hace referencia a la orientación de la fibra. Se procede a la validación de la consistencia del modelo. En las **Tabla 17** y **Tabla 18** se demuestra la significancia del modelo de regresión, como a su vez, de los coeficientes de este. Los supuestos son validados de manera correcta. Este modelo presenta un R^2 ajustado de 0.8283.

SoV	DoF	SS	MS	Fo	Valor P
Regresión	1	125876697	125876697	25.1267954	0.00742369
Residuos	4	20038639.2	5009659.8		
Total	5	145915336			

Tabla 17. ANOVA del modelo de regresión propuesto para la fibra de vidrio.

Fuente	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	6118.76354	1119.11347	5.46750953	0.00544321
-1/exp(O)	-9716.35336	1938.36138	-5.01266351	0.00742369

Tabla 18. Validación de coeficientes del modelo.

12.3.2. MODELO DE FIBRA DE CARBONO

El análisis gráfico utilizado para la fibra de vidrio es también utilizado para la generación de modelos descriptivos para la fibra de carbono. El modelo desarrollado es el siguiente:

$$Resist = 44709.84 - 1955.5 * O + 24.44 * O^2 \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde “O” hace referencia a la orientación de la fibra. Se procede a la validación de la consistencia del modelo. En las **Tabla 19** y **Tabla 20** se demuestra la significancia del modelo de regresión, como a su vez, de los coeficientes de este. Los supuestos son validados de manera correcta. Este modelo presenta un R^2 ajustado de 0.9720.

SoV	DoF	SS	MS	Fo	Valor P
Regresión	2	1686385373	843192686.5	87.98639972	0.002170208
Residuos	3	28749648.44	9583216.147		
Total	5	1715135021			

Tabla 19. ANOVA del modelo de regresión propuesto para la fibra de carbono.

Fuente	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
--------	---------------	--------------	---------------	--------------

Intercepción	44709.84259	2188.974206	20.4250203	0.000256595
O	-1955.504203	248.0360487	-7.883951601	0.004252462
O ²	24.44354076	5.29567394	4.615756378	0.019134923

Tabla 20. Validación de coeficientes del modelo.

12.3.3. MODELO DE FIBRA DE ARAMIDA

De manera similar que la fibra de vidrio, la fibra de aramida describe un comportamiento exponencial con una asíntota paralela al eje X. Se propone el siguiente modelo:

$$Resist = 20842.31 - 25240.17 * \left(-\frac{1}{e^O} \right) \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde “O” hace referencia a la orientación de la fibra. Se procede a la validación de la consistencia del modelo. En las **Tabla 21** y **Tabla 22** se demuestra la significancia del modelo de regresión, como a su vez, de los coeficientes de este. Los supuestos son validados de manera correcta. Este modelo presenta un R² ajustado de 0.8506.

SoV	DoF	SS	MS	Fo	Valor P
Regresión	1	849421795.4	849421795.4	29.48863549	0.005578601
Residuos	4	115220223.8	28805055.96		
Total	5	964642019.2			

Tabla 21. ANOVA del modelo de regresión propuesto para la fibra de aramida.

Fuente	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	20842.3196	2683.517093	7.76679219	0.001481324
-1/exp(O)	-25240.17327	4647.987949	-5.430343957	0.005578601

Tabla 22. Validación de coeficientes del modelo.

12.4. MODOS DE FALLA


En la siguiente tabla se realiza una caracterización de los modos de falla obtenidos durante las corridas experimentales. En la **Tabla 23** se categorizan los diferentes modos de falla encontrados en las probetas experimentales, de acuerdo con lo establecido por la normativa ASTM D3039.



Se puede observar que la dirección prominente de falla de las probetas se encuentra relacionada al comportamiento anisotrópico de los materiales compuestos reforzados con fibra. Esto refiere a la relación de aspecto o la razón l/d presente en las fibras. La resistencia de los materiales compuestos con fibras aumenta respecto al aumento de esta relación. Las fibras tienen a fallar debido a imperfecciones superficiales, por tanto, entre menos diámetro tenga una fibra, habrá menos superficie expuesta a fallas o imperfecciones. Esto reduce sustancialmente la posibilidad de falla o de propagación de estas bajo condiciones de carga. A su vez, los bordes de las fibras poseen menor capacidad de carga que la fibra misma, por tanto, es preferible que el compuesto este integrado por secciones prolongadas de fibra. De acuerdo a lo anterior, se puede observar que el inicio de las superficies de fractura se encuentra alineado respecto a los segmentos de fibra que poseen menor longitud en la probeta. Siendo estos puntos, el inicio de la falla y, por consiguiente, las zonas de menor capacidad de resistencia ante esfuerzos axiales.



Es importante a su vez considerar, el efecto del módulo de elasticidad del compuesto sobre el comportamiento general a tensión de las probetas. De acuerdo a la teoría de mezclas [92], la rigidez general del material compuesto dependerá del aporte particular que cada componente que lo integra respecto a su fracción de volumen en la mezcla. Sin embargo, una vez la matriz empiece a deformarse, esta no recibirá más carga y el módulo de elasticidad general del compuesto será el de la fibra. Las fibras poseen diferentes módulos de elasticidad dependiendo de la dirección en la cual la carga es aplicada. La resina por su parte posee un comportamiento más homogéneo e isotrópico ante la exposición a esfuerzos. Considerando que los segmentos de fibra con menor longitud en las probetas de compuesto son posibles secciones de inicio de falla, el módulo de elasticidad en una orientación diferente a 0° será menor [93][94], generando menor rigidez y por tanto, mayor deformación que conlleva al debilitamiento y falla de la probeta en general.



A su vez, en las probetas orientadas a 0° , una vez una de las capas interiores falla a tensión (ruta de falla horizontal debido a menor capacidad de resistencia de las secciones remanentes orientadas a 90°), las capas circundantes experimentan distribuciones de esfuerzo aleatorias y desiguales (distintas secciones de área transversal), lo cual conlleva a una inmediata delaminación de dichas capas.



Considerando lo anterior, a medida que la orientación de las fibras aumenta respecto al eje axial, hay un debilitamiento de la capacidad de resistencia del compuesto, convergiendo en la capacidad de resistencia de la resina. Sin embargo, de acuerdo a las especificaciones técnicas de las fibras [95], la resistencia específica a la tensión de la aramida es mucho mayor que la propuesta por las otras fibras evaluadas, lo cual permite obtener una resistencia promedio superior a los otros materiales evaluados en lo que refiere a la resistencia obtenida al variar la orientación de la fibra.

# Probeta	Fotografía	Fabricación	Categorización	Comentarios
1		Orientación 45° . Fibra de Carbono.	DGR (Edge delamination, Gage, Right).	La probeta se deformó cediendo en dirección del estiramiento. Delaminación parcial de la parte superior con zona de falla a 45° .

2		Orientación 0°. Fibra de vidrio.	AGT (Angled, Gage, Top).	La fractura es parcialmente horizontal, originada en la longitud calibrada resultante de cortante puro.
3		Orientación 45°. Fibra de vidrio.	DGR (Edge delamination, Gage, Right). AAT (Angled, At grip/tap, Top).	La probeta se deformó cediendo en dirección del estiramiento. Hubo delaminación y fractura de capas superficiales. Zona superior de falla a 45°.

4		Orientación 22.5°. Fibra de vidrio.	DAR (Edge delamination, At grip/tab, Right). AAT (Angled, At grip/tab, Top).	La probeta se deformó cediendo en dirección del estiramiento. Hubo delaminación y fractura de capas superficiales. Zona superior de falla en ángulo.
5		Orientación 0°. Fibra de carbono.	XGT (Explosive, Gage, Top).	La probeta presenta superficie de falla horizontal a cortante puro.

6		Orientación 22.5°. Fibra de aramida.	DAR (Edge delamination, At grip/tab, Right). AAT (Angled, At grip/tab, Top).	La probeta se deformó cediendo en dirección del estiramiento. Hubo delaminación y fractura de capas internas, lo que generó la delaminación general de la probeta.
7		Orientación 45°. Fibra de aramida.	DAR (Edge delamination, At grip/tab, Right). AAT (Angled, At grip/tab, Top).	La probeta se deformó cediendo en dirección del estiramiento. Hubo delaminación y fractura de capas superficiales. Zona superior de falla a 0°.

8		Orientación 22.5°. Fibra de carbono.	DAR (Edge delamination, At grip/tab, Right).	La probeta se deformó cediendo en dirección del estiramiento. Delaminación parcial de la parte superior con zona de falla en ángulo.
9		Orientación 0°. Fibra de aramida.	MGM (Multi-mode, Gage, Middle). DGM (Edge delamination, Gage, Middle).	La probeta presenta fractura orientada horizontalmente de capas superficiales e internas, generando debilitamiento general y posterior delaminación de la probeta.


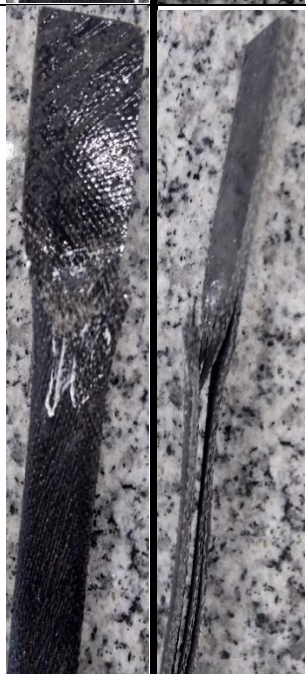
10






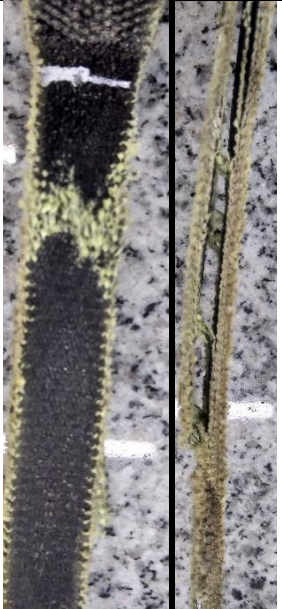
Orientación 45°.
Fibra de
carbono.

DGM
(Edge
delamination,
Gage, Middle).

La probeta se
deformó
cediendo en
dirección del
estiramiento.
Hubo
delaminación y
fractura de
capas
interiores. Zona
media de falla a
45°.

11		Orientación 0°. Fibra de vidrio.	AGT (Angled, Gage, Top).	La probeta presenta superficie de falla horizontal a cortante puro. Fractura de capas superficiales e interiores.
12		Orientación 45°. Fibra de vidrio.	AAT (Angled, At grip/tab, Top).	La probeta se deformó cediendo en dirección del estiramiento. Hubo delaminación y fractura de capas superficiales. Zona superior de falla a 45° en V.

13		<p>Orientación 22.5°. Fibra de vidrio.</p>	<p>AAT (Angled, At grip/tab, Top).</p>	<p>La probeta se deformó cediendo en dirección del estiramiento. Hubo delaminación y fractura de capas superficiales. Zona superior de falla en ángulo.</p>
14		<p>Orientación 0°. Fibra de carbono.</p>	<p>AAT (Angled, At grip/tab, Top).</p>	<p>La probeta presenta fractura orientada horizontalmente de capas internas, generando debilitamiento general y posterior delaminación de la probeta.</p>

15		<p>Orientación 22.5°. Fibra de aramida.</p>	<p>AAT (Angled, At grip/tab, Top). DAT (Edge delamination, At grip/tab, Top).</p>	<p>La probeta se deformó cediendo en dirección del estiramiento. Hubo delaminación y fractura de capas superficiales. Zona superior de falla en ángulo.</p>
16		<p>Orientación 45°. Fibra de aramida.</p>	<p>AGT (Angled, Gage, Top). DGT (Edge delamination, Gage, Top).</p>	<p>La probeta se deformó cediendo en dirección del estiramiento. Hubo delaminación y fractura de capas superficiales e interiores. Zona superior de falla con ángulo de 45° en V.</p>



17		<p>Orientación 22.5°. Fibra de carbono.</p>	<p>AGT (Angled, Gage, Top). DGT (Edge delamination, Gage, Top).</p>	<p>La probeta se deformó cediendo en dirección del estiramiento. Hubo delaminación y fractura de capas interiores. Zona superior de falla en ángulo.</p>
18		<p>Orientación 0°. Fibra de aramida.</p>	<p>AAT (Angled, At grip/tab, Top). DAT (Edge delamination, At grip/tab, Top).</p>	<p>La probeta presenta fractura orientada horizontalmente de capas internas, generando debilitamiento general y posterior delaminación de la probeta. Zona de falla orientada con ángulo.</p>

Tabla 23. Caracterización de modos de falla de corridas experimentales fase 1.

12.5. APLICABILIDAD DE LA SOLUCIÓN COMPUESTA

De acuerdo con la información auscultada referente al transporte de hidrocarburos, resulta importante el poder determinar la capacidad de aplicación de este tipo de materiales como sistemas de reparación/rehabilitación en la industria Oil&Gas. Se trabajó de manera coordinada con un operador de gas natural local, el cual, es un referente representativo para el estudio de sistemas de transporte de hidrocarburos a nivel Colombia. En ese contexto, se observó y analizó el sistema de tuberías implementado. Las tuberías utilizadas por este operador tienen como material de referencia API 5L X60, el cual tiene una resistencia a la tensión de 75 KPSI.

El sistema se compone de distintos tramos de tubería que comprenden una longitud total de 876 kilómetros aproximadamente. Posee distintos diámetros que van desde 10 pulgadas hasta 32 pulgadas de diámetro. A su vez, el espesor de estas va desde 0.203 pulgadas, hasta 0.75 pulgadas en algunas secciones. En el contexto local, el transporte del gas natural se realiza a una presión máxima de 1.2 KPSI hasta una presión mínima de 0.79 KPSI.

De acuerdo a lo anterior, se puede realizar una aproximación para determinar los esfuerzos a los cuales está sometido el sistema de tubería. En una tubería, el esfuerzo predominante en el sistema es de carácter radial o circunferencial, generando esfuerzos de tensión sobre las paredes del tubo debido a la presión interna. El sistema de tuberías se considera como un sistema de deformación plana, y el efecto de los esfuerzos axiales sobre el sistema son tan pequeños que pueden ser descartados. Asumiendo el sistema, como un tubo de pared delgada *Ecuación 5*, se puede encontrar el rango de esfuerzos típicos a los cuales el sistema de tuberías del operador local se encuentra sometido.

$$\sigma_c = \frac{P_i * D}{2 * t_{tub}} \quad \text{Ecuación 5.}$$

Siendo σ_c el esfuerzo circunferencial al cual la tubería se encuentra sometida, P_i la presión interna de transporte del hidrocarburo, D el diámetro del ducto, y t_{tub} el espesor de la tubería. Por tanto, en base a la información revisada del operador local, el esfuerzo máximo al que se encuentra sometida la tubería es de 36 KPSI. Sin embargo, este es el cálculo sin la presencia de un defecto en o través de la superficie de la tubería. La aplicación de métodos de intervención como lo son los materiales compuestos se realiza en presencia de un defecto en el ducto. De acuerdo con [96], aproximadamente el 80% de los defectos presentes en tubería subterránea son de carácter corrosivo. A su vez, defectos como lo son las abolladuras, requieren un estudio más detallado y complejo para determinar mediante elementos finitos (FEA) el estado de

esfuerzos de la tubería, ya que cada geometría de abolladura es única. Por tanto, el presente cálculo se enfoca en la aplicación de soluciones de reparación/rehabilitación sobre tuberías sometidas a defectos de corrosión con un 80% como máximo de pared de tubería comprometida, por tanto, se tiene la ecuación Ecuación 6. [5]:

$$\sigma_c = \frac{P_i * D}{2 * (t_{tub} - d)}$$

Ecuación 6.

Donde d hace referencia a la profundidad del defecto. En presencia de un defecto que reduzca el espesor de pared de la tubería hasta un 80%, el esfuerzo aumentaría de esta forma hasta 45 KPSI en la zona del defecto. Defectos que comprometan mayor porcentaje del espesor de la tubería se consideran inviables de reparar o rehabilitar, recomendando el reemplazo inmediato de acuerdo a la normativa disponible (ASME B31G).

Considerando los esfuerzos previamente calculados, se puede observar que la resistencia promedio de la fibra de carbono es de aproximadamente 44.5 KPSI y de la fibra de aramida es de 46.7 KPSI, demostrando tener potencial suficiente para soportar los esfuerzos presentes en una tubería y desempeñarse como sistemas de reparación/rehabilitación. Sin embargo, para poder determinar su aplicabilidad definitiva, se requiere la realización de pruebas de estallido en probetas con dimensiones especificadas en las normas ASME PCC2 e ISO 24817.

Por otro lado, puede verificarse mediante modelos matemáticos ya desarrollados la capacidad mecánica de estos materiales utilizando propiedades conocidas de los mismos [97][98]. Para el cálculo de los esfuerzos mediante modelos matemáticos previamente establecidos, se requieren algunos datos como lo son los módulos de Young del material compuesto en dirección radial y circunferencial, además de, el espesor de la reparación de acuerdo a lo comentado por la norma (ISO 24817), la profundidad y geometría del defecto, el diámetro de la tubería en el que se implementa la reparación, el módulo de Young de la tubería, reducción de presión en la tubería, etc. El módulo de Young del material compuesto, es fundamental para la determinación de la resistencia mecánica de la reparación, se traduce en el cálculo del número de capas requeridas para soportar la presión interna de la tubería [99].

El número de capas utilizado en la experimentación se tomó de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM 3039D para estudio de propiedades a tensión de materiales compuestos de forma que pueda conocerse el efecto de factores como lo son la orientación de la fibra y el tipo de fibra en dicha propiedad mecánica. Por tanto, la concreta determinación de la capacidad de

reparación y/o rehabilitación de este tipo de materiales no corresponde al alcance de la presente investigación y requiere, como se mencionó, pruebas y ensayos posteriores.

13. CONCLUSIONES

De la presente investigación, se puede concluir que:

- Derivado de la investigación realizada y el estudio de caso realizado de la mano de un operador de transporte de gas local, se puede concluir que la implementación de técnicas de intervención utilizando materiales compuestos ha venido en aumento debido a su versatilidad en la amplia variedad de defectos a los cuales aplica, además de, su económica y sencilla aplicación en comparación con otro tipo de intervenciones.
- El comportamiento mecánico de la resina y su resistencia térmica, son los principales puntos por considerar al momento de seleccionar la matriz polimérica para la fabricación de materiales compuestos. Como se demostró en el estudio de sensibilidad, el calor tiene un efecto de disminución de la capacidad mecánica del compuesto. El modelo experimental derivado de dichas pruebas muestra un comportamiento exponencial decreciente a medida que el compuesto experimenta un aumento en la temperatura.
- De acuerdo con los resultados obtenidos en la experimentación de sensibilidad, esta variación del comportamiento mecánico ante incidencias térmicas puede no afectar el desempeño de las reparaciones/rehabilitaciones que utilicen materiales compuestos, siempre y cuando se controlen las temperaturas máximas alcanzadas en el proceso de transporte del hidrocarburo. Basado en el mismo estudio, la variación sufrida por la resistencia mecánica desde la temperatura ambiente (30 °C) hasta la temperatura crítica establecida (60 °C) fue de solo un 13%. Este delta en la resistencia mecánica no afecta sobre medida la capacidad mecánica del material, manteniéndose dentro de los valores esperados y aceptables de acuerdo con lo establecido por la literatura. Sin embargo, cuando hay un aumento de temperatura hasta los 90 °C o los 150 °C, la resistencia mecánica decae un 25% o un 40% respectivamente, comprometiendo la integridad o capacidad del compuesto.
- De acuerdo con lo evidenciado en la experimentación, las resinas epoxi demuestran tener la capacidad de ser manufacturadas con propiedades de resistencia térmica elevada, lo cual brinda una mejora en el comportamiento general del compuesto. La resina utilizada demostró poseer capacidades de resistencia a elevadas temperaturas.
- Se desarrollaron en la presente investigación, modelos matemáticos que logran describir el comportamiento de los materiales compuestos y los efectos que la temperatura tiene sobre estos. Estos modelos tienen pertinencia, siempre y cuando, los materiales estudiados contemplen en su fabricación mantos bidireccionales de similar gramaje, y utilicen resinas epóxicas de igual o similar capacidad mecánica.

- El Análisis Estadístico de Experimentos (DoE) demostró ser una herramienta útil para determinar si la variación inducida por el cambio en la orientación de la fibra y/o el tipo de fibra, es significativa en comparación con la variabilidad natural de los resultados debido al proceso de síntesis y caracterización de este tipo de materiales.
- Se demostró que la mejor orientación de trabajo de las fibras es cuando estas están dispuestas a 0° en torno a su dirección de tensión. Por su parte, el tipo de fibra que representa una capacidad mayor de resistencia a los esfuerzos de tensión es la aramida.
- La fibra de carbono demuestra poseer elevada capacidad de carga con orientaciones de 0° , lo cual puede representar una oportunidad económica para el sector considerando su reducido precio respecto a la fibra de aramida.
- Se recomienda el uso de la fibra de aramida puesto que su comportamiento general superior al de las otras fibras, considerando que, al momento de un posible montaje sobre tubería o estructura, el traslape entre capas no garantiza un posicionamiento exacto de 0° .
- La relación de aspecto de las fibras integradas en el material compuesto, juega un rol importante en el desempeño mecánico del sistema general.
- El comportamiento matemático derivado del análisis experimental realizado, devela que el comportamiento de las fibras de vidrio y aramida puede ser descrito por un modelo exponencial inverso que decrece al aumentar la orientación de la fibra. Por su parte, la fibra de carbono muestra un comportamiento cuadrático. Estos modelos desarrollados brindan un aporte al actual estado del arte sobre el comportamiento de este tipo de materiales implementados a la industria del petróleo y gas.
- Existe una oportunidad investigativa en el desarrollo de modelos experimentales que permitan conocer a profundidad el comportamiento mecánico de este tipo de materiales al generar variaciones en su composición (variación en la proporción de fibra-resina-catalizador) y su proceso de manufactura.
- El desarrollo de modelos descriptivos derivados de experimentación que relacione el comportamiento mecánico de los materiales compuestos respecto a variaciones de temperatura puede no tener relevancia para ciertas condiciones operacionales en la industria de transporte de hidrocarburos, siempre y cuando, las tuberías no sean sometidas a grandes deltas de temperatura, o estas no se encuentren expuestas a la intemperie. Sin embargo, este tipo de modelos puede resultar de vital interés para las industrias automotriz y aeroespacial, las cuales someten estos materiales a otros tipos de condiciones de operación, las cuales incluyen cargas térmicas.

- La longitud de las fibras resulta importante al momento de realizar un montaje de sistema de reparación o rehabilitación de tuberías, pues los puntos con menor longitud de fibra sometidos a tensión se comportan como concentradores de esfuerzo.

14. TRABAJOS FUTUROS

En cuanto a los materiales compuestos, las siguientes oportunidades de innovación se visualizan inicialmente:

- La tendencia en las reparaciones que implementan materiales compuestos es hacer que los sistemas sean más ligeros, más fuertes y menos costosos. La compatibilidad química, la resistencia a la corrosión y la facilidad de aplicación son requisitos que deben tenerse en cuenta.
- Es de interés desarrollar resinas o matrices poliméricas de bajo costo que puedan operar adecuadamente en condiciones de alta presión y alta temperatura.
- Un desafío importante es el desarrollo de soluciones de rehabilitación activas que integren el uso de mangas compuestas o materiales compuestos, y ofrezcan alivio inmediato de esfuerzos sobre tubería comprometida, sin la necesidad de disminuir la presión de transporte del hidrocarburo.
- Es importante encontrar o determinar una fibra de bajo costo que pueda mejorar suficientemente la integridad de la tubería cuando se aplique de forma que corrija los defectos presentes en la tubería. En este orden de ideas, se deben explorar alternativas diferentes a la fibra de vidrio, carbono o aramida, que integren materiales naturales o nuevas fibras de refuerzo con cables, varillas o mallas de acero de alta resistencia. Lo cual requerirá una fase experimental mucho más compleja.
- Determinar metodologías de manufactura y/o corte que permitan la obtención de probetas de ensayo que cumplan de manera rigurosa las dimensiones y tolerancias especificadas por la norma ASTM D3039.
- Se sugiere realizar experimentación futura con respecto a las relaciones de masa en la mezcla y elaboración de materiales compuestos, brindadas de manera explícita por los fabricantes. Investigaciones han demostrado que la variación de estos parámetros puede generar un aumento o cambio en las propiedades mecánicas del conjunto compuesto.
- Se propone continuar la investigación de propiedades mecánicas de materiales compuestos ante la variación de orientación de la fibra, tipo de fibra y temperatura, para la determinación de su efecto en las diferentes propiedades mecánicas como lo son la resistencia a cortante, compresión, o módulo de elasticidad, entre otras.

- Se motiva a la profundización de la presente investigación mediante el uso de fibras unidireccionales, de forma que se extienda el rango operacional de la orientación de las fibras.
- Se propone realizar una validación de la presente investigación implementando un mayor número de réplicas y el uso de sistemas de vacío para la manufactura de material compuesto.
- Finalmente, la implementación de pruebas de campo de estallido en presencia de un defecto estándar conocido, de forma que pueda demostrarse la capacidad de reparación/rehabilitación de los materiales compuestos. Estos sistemas a su vez pueden combinarse con sistemas de camisa metálica que integren inyección de resina a presión para generar un efecto aparente a la disminución de presión de transporte y proyectarse como alternativas activas para la industria.

15. BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. K. Dey, S. O. Ogunlana, and S. Naksuksakul, "Risk-based maintenance model for offshore oil and gas pipelines: a case study," *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 169–183, 2004.
- [2] N. S. Grigg, "Assessment and renewal of water distribution systems," 2004.
- [3] R. Co, S. Mannesmann, and F. Gmbh, "Rehabilitation of 32" Gas Pipeline in the most Cost Effective way," 2011.
- [4] E. Kudina, S. N. Bukharov, V. P. Sergienko, and A. Dumitrescu, "Comparative Analysis of Existing Technologies for Composite Repair Systems," 2018.
- [5] H. Toutanji and S. Dempsey, "Stress modeling of pipelines strengthened with advanced composites materials," *Thin-Walled Struct.*, vol. 39, no. 2, pp. 153–165, 2001.
- [6] F. James G. and T. Jr., Alice, "REPAIR CLAMP STRUCTURE AND METHOD," US2651329A, 1953.
- [7] P. W. S, "REPAIR CLIP FOR PIPES, SHAFTS, &c.," US865056A, 1907.
- [8] L. John J. Bardgette, Orleans Parish, and Luther S. Moody, Jefferson Parish, "PRESSURIZED REPAIR CLAMP FOR PIPELINE," US3496963A, 1970.
- [9] B. G. Corp, "Improvements in sealing a leak in a pipe or pipeline carrying fluid under pressure," GB2093146A.
- [10] V. Manfred, "APPARATUS FOR SEALING LEAKS," US4448218A, 1984.
- [11] W. Stig, "REPAIR SLEEVE FOR PIPING," US4647072A, 1987.
- [12] M. Keith, "PIPE REPAIR CLAMP," US4653782A, 1987.
- [13] F. W. Gilleland, "EXPANDABLE TUBE APPARATUS FOR REPAIRING PIPELINES," US5042532A, 1996.
- [14] L. Charles L, "LEAK REPAIR CLAMP," US5118139A, 1994.
- [15] G. Alfeo and P. Valentino, "METHOD FOR REPAIRING LOCAL DAMAGE TO PIPELINES BY APPLYING CLADDING WITH AN INTERPOSED PROTECTIVE SHEATH," US5345972A, 1996.
- [16] N. Jim - B., "CHAMBERED LEAK REPAIRING DEVICE AND METHOD," US6220302B1, 2003.

- [17] R. A. Daspit, "PIPELINE REPAIR ANTI-CORROSION ELECTRICALLY ISOLATED CLAMP-COUPLING," vol. 1, no. 12, 2002.
- [18] M. W. Gaston and A. Lance Richard, "CLAMP FOR STOPPING GAS LEAKS," US6675836B1, 2009.
- [19] J. Laurence S., Smith and B. W. Dowden, "PIPE REPAIR CLAMP," US6305719B1, 2001.
- [20] A.-O. Abdulaziz K., "SPLIT SLEEVE CLAMP ASSEMBLY," US7617843B1, 2009.
- [21] N. Nagendran A/L C, R. A. De Raj, and L. K. Hoong, "METHOD AND MEANS OF REPAIRING A PIPE," US20040129373A1, 2004.
- [22] D. A. S. Boulet and H. Slimani, "Manchon a insert pour la reparation d'une canalisation de transport de fluide a haute pression," FR2851635A1, 2006.
- [23] Д. С. Б. (FR) Д. С. Б. А. С. (FR) А. СЛИМАНИ, "Coupling for repairing high-pressure pipeline," RU2300045C2.
- [24] S. B. D'Auria and S. Hacen, "SLEEVE WITH INSERT FOR REPAIRING HIGH-PRESSURE FLUID PIPES," US20060162797A1, 2006.
- [25] D. Kakoschke, R. Pavon, and M. Urednicek, "Compression pipe repairing and reinforcing methods," US7066210B2, 2006.
- [26] R. N. Borland and J. Henry E. Topf, "PIPELINE REPAIR SYSTEM AND METHOD OF INSTALLATION," US7165579B2, 2003.
- [27] M. J. Skellern, K. Wyness, and R. Ollerhead, "PIPE REPAIR CLAMP WITH SELF PRESSURIZING SEAL," US20110241342A1, 2011.
- [28] N. J. Venero, R. N. Burke, and T. J. M. Bond, "Methods for repairing a defective pipeline," US20110284115A1, 2011.
- [29] D. T. Benson, D. Krohn, and N. K. Vuong, "Chained clamp pipeline repair structure and method of use," US20130255816A1, 2013.
- [30] S. Patriarca, "ENCAPSULATION COLLAR FOR PIPELINES," US20160109050A1, 2016.
- [31] J. W. Clark and J. Robb, "SYSTEM AND METHOD FOR MODULAR REPAIR OF PIPE LEAKS," US8210210B2, 2012.
- [32] M. Wolf and M. Peschka, "Device and method for repairing a pipeline," US7950418B2, 2011.
- [33] B. L. Rice, "SYSTEM AND METHOD FOR PIPE REPAIR," US7673654B2, 2010.
- [34] J. A. Morton, "COMPOSITE WRAP REPAIR OF INTERNAL DEFECTS," US7673655B1,

2011.

- [35] C. J. Lazzara and J. R. Schwarz, "Protective seal for pipeline assembly," US8522827B2, 2010.
- [36] I. Neptune research, "UNIDIRECTIONAL FIBER COMPOSITE SYSTEM FOR STRUCTURAL REPAIRS AND REINFORCEMENT," US20150204476A1, 2015.
- [37] J. A. Morton, J. M. Wilson, and D. B. Kadakia, "COMPOSITE LOAD TRANSFERRING TECHNIQUE," US7900655B2, 2011.
- [38] J. M. Souza, "PIPE RESTRAINING REPAIR METHOD AND STRUCTURE FOR PIPING STRUCTURES USING COMPOSITES," US20140048164A1, 2014.
- [39] PRCI, "Pipeline repair manual," p. 193, 2006.
- [40] T. J. Vaughan and C. T. McCarthy, "A combined experimental-numerical approach for generating statistically equivalent fibre distributions for high strength laminated composite materials," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 70, no. 2, pp. 291–297, 2010.
- [41] D. Trias, J. Costa, J. A. Mayugo, and J. E. Hurtado, "Random models versus periodic models for fibre reinforced composites," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 38, no. 2, pp. 316–324, 2006.
- [42] M. Hojo, M. Mizuno, T. Hobbiebrunken, T. Adachi, M. Tanaka, and S. K. Ha, "Effect of fiber array irregularities on microscopic interfacial normal stress states of transversely loaded UD-CFRP from viewpoint of failure initiation," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 69, no. 11–12, pp. 1726–1734, 2009.
- [43] R. Pyrz, "Correlation of microstructure variability and local stress field in two-phase materials," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 177, no. 1–2, pp. 253–259, 1994.
- [44] C. González and J. LLorca, "Multiscale modeling of fracture in fiber-reinforced composites," *Acta Mater.*, vol. 54, no. 16, pp. 4171–4181, 2006.
- [45] V. A. Buryachenko, N. J. Pagano, R. Y. Kim, and J. E. Spowart, "Quantitative description and numerical simulation of random microstructures of composites and their effective elastic moduli," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 40, no. 1, pp. 47–72, 2003.
- [46] A. R. Melro, P. P. Camanho, and S. T. Pinho, "Generation of random distribution of fibres in long-fibre reinforced composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 68, no. 9, pp. 2092–2102, 2008.
- [47] D. Trias, *Analysis and Simulation of Transverse Random Fracture of Long Fibre Reinforced Composites*. 2005.

- [48] R. Pyrz, "Quantitative description of the microstructure of composites. Part I: Morphology of unidirectional composite systems," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 2, pp. 197–208, 1994.
- [49] D. M. Frangopol and S. Recek, "Reliability of fiber-reinforced composite laminate plates," *Probabilistic Eng. Mech.*, vol. 18, no. 2, pp. 119–137, 2003.
- [50] F. Chang and K.-Y. Chang, "A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations," vol. 21, no. September, pp. 834–855, 1987.
- [51] S. Mortazavian and A. Fatemi, "Effects of fiber orientation and anisotropy on tensile strength and elastic modulus of short fiber reinforced polymer composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 72, pp. 116–129, 2015.
- [52] S. Ekşi and K. Genel, "Comparison of mechanical properties of unidirectional and woven carbon, glass and aramid fiber reinforced epoxy composites," *Acta Phys. Pol. A*, vol. 132, no. 3, pp. 879–882, 2017.
- [53] S. Ekşi and K. Genel, "Three point bending behavior of woven glass, aramid and carbon fiber reinforced hybrid composite tube," *Acta Phys. Pol. A*, vol. 128, no. 2, pp. 59–61, 2015.
- [54] J. B. Henderson, J. A. Wiebelt, and M. R. Tant, "A Model for the Thermal Response of Polymer Composite Materials with Experimental Verification," *J. Compos. Mater.*, vol. 19, no. 6, pp. 579–595, 1985.
- [55] J. B. Henderson, J. A. Wiebelt, and M. R. Tant, "A Model for the Thermal Response of Polymer Composite Materials with Experimental Verification," *J. Compos. Mater.*, vol. 19, no. 6, pp. 579–595, 1985.
- [56] Roberto Bruschi, "HYDROCARBON TRANSPORT AND GAS STORAGE," in *Encyclopedia of Hydrocarbons*, vol. 1, 2005.
- [57] P. Chica, R. J. S. K., and M. Ramirez, "Design for Manufacturing and Assembly and Cae Tools : the Case of a Rice Husker," vol. 22, no. 1, pp. 4–5, 2011.
- [58] S. K. Sinha and R. A. McKim, "Probabilistic based integrated pipeline management system," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 22, no. 5–6, pp. 543–552, 2007.
- [59] M. L. T. Cossio *et al.*, *Trenchless Technology Piping: Installation and Inspection*, vol. XXXIII, no. 2. 2012.
- [60] M. Shamsuddoha, M. M. Islam, T. Aravinthan, A. Manalo, and K. tak Lau, "Effectiveness of using fibre-reinforced polymer composites for underwater steel pipeline repairs," *Compos. Struct.*, vol. 100, pp. 40–54, 2013.

- [61] C. I. Ossai, B. Boswell, and I. J. Davies, "Pipeline failures in corrosive environments - A conceptual analysis of trends and effects," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 53, pp. 36–58, 2015.
- [62] B. Rajani and Y. Kleiner, "Comprehensive Review of Structural Deterioration of Water Mains : Physically Based Models," *Urban Water*, vol. 3, no. 3, pp. 151–164, 2001.
- [63] K. Farrag, "Selection of Pipe Repair Methods," *Final Rep. GTI Proj. Number 21087 Gas Technol. Inst.*, no. 21087, 2013.
- [64] ASME, "Repair of Pressure Equipment and Piping ASME PCC 2," *Media*, pp. 2009–2009, 2009.
- [65] A. P. Cisilino, M. D. Chapetti, and J. L. Otegui, "Minimum thickness for circumferential sleeve repair fillet welds in corroded gas pipelines," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 79, no. 1, pp. 67–76, 2002.
- [66] J. L. Otegui, A. Rivas, C. Manfredi, and C. Martins, "Weld failures in sleeve reinforcements of pipelines," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 8, no. 1, pp. 57–73, 2001.
- [67] J. L. Otegui, A. Cisilino, A. E. Rivas, M. Chapetti, and G. Soula, "Influence of multiple sleeve repairs on the structural integrity of gas pipelines," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 79, no. 11, pp. 759–765, 2002.
- [68] C. K. Oh, Y. J. Kim, J. H. Baek, Y. P. Kim, and W. S. Kim, "Ductile failure analysis of API X65 pipes with notch-type defects using a local fracture criterion," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 84, no. 8, pp. 512–525, 2007.
- [69] P. Hopkins, U. K. G. Goodfellow, U. K. R. Ellis, U. K. J. Haswell, U. K. N. Jackson, and N. Grid, "THE FLEXIBLE GROUTED CLAMP - A NOVEL APPROACH TO EMERGENCY PIPELINE REPAIR," *Symp. A Q. J. Mod. Foreign Lit.*, vol. 44, no. 0, pp. 0–22, 2011.
- [70] J. M. Duell, J. M. Wilson, and M. R. Kessler, "Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 85, no. 11, pp. 782–788, 2008.
- [71] A. International, "Basic Understanding of Weld Corrosion," *Corros. Weldments*, no. Ref 1, pp. 1–13, 2006.
- [72] "Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines," *Am. Soc. Mech. Eng.*, 2003.
- [73] "Remaining Strength of Corroded Pipe (RSTRENG) Assessment Procedure," pp. 0–44.
- [74] D. N. Veritas, "RECOMMENDED PRACTICE DNV-RP-F101," no. October, 2010.
- [75] A. Cosham and P. Hopkins, "The assessment of corrosion in pipelines—Guidance in the

pipeline defect assessment manual (PDAM)," *Reliab. High Press. Steel Pipelines*, vol. 44, no. 0, pp. 0–29, 2003.

- [76] J. G. Kaufman, "Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing," 2017.
- [77] Bs. B. Standards, "Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures," *BSI Stand. Publ.*, vol. 3, no. 1, p. 306, 2005.
- [78] A. Cosham, P. Hopkins, and K. A. Macdonald, "Best practice for the assessment of defects in pipelines – Corrosion," vol. 14, pp. 1245–1265, 2007.
- [79] N. R. F. Rohem, L. J. Pacheco, S. Budhe, M. D. Banea, E. M. Sampaio, and S. de Barros, "Development and qualification of a new polymeric matrix laminated composite for pipe repair," *Compos. Struct.*, vol. 152, pp. 737–745, 2016.
- [80] J. L. C. Diniz, R. D. Vieira, J. T. Castro, A. C. Benjamin, and J. L. F. Freire, "Stress and strain analysis of pipelines with localized metal loss," *Exp. Mech.*, vol. 46, no. 6, pp. 765–775, 2006.
- [81] C. Alexander, "Advances in the Repair of Pipelines Using Composite Materials," *Pipeline Gas Technol.*, no. July, pp. 1–11, 2009.
- [82] J. Baek, W. Kim, and Y. Kim, "Comparative Study for Various Repair Methods of In-Service Pipeline Using Full Scale Burst Test," *23rd World Gas Conf. Amsterdam*, 2006.
- [83] H. S. Da Costa Mattos, J. M. L. Reis, L. M. Paim, M. L. Da Silva, F. C. Amorim, and V. A. Perrut, "Analysis of a glass fibre reinforced polyurethane composite repair system for corroded pipelines at elevated temperatures," *Compos. Struct.*, vol. 114, no. 1, pp. 117–123, 2014.
- [84] A. F. M. Arif *et al.*, "Optimization of Pipe Repair Sleeve Design," *J. Press. Vessel Technol.*, vol. 134, no. October 2012, p. 051702, 2012.
- [85] J. L. F. Freire, R. D. Vieira, J. L. C. Diniz, and L. C. Meniconi, "Part 7: Effectiveness of composite repairs applied to damaged pipeline," *Exp. Tech.*, vol. 31, no. 5, pp. 59–66, 2007.
- [86] M. S. G. Chiodo and C. Ruggieri, "Failure assessments of corroded pipelines with axial defects using stress-based criteria: Numerical studies and verification analyses," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 86, no. 2–3, pp. 164–176, 2009.
- [87] ASTM, "Astm D3039/D3039M," *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–13, 2014.
- [88] Sandjay; K. Mazumdar, *COMPOSITES MANUFACTURING :Materials, Product, and Process Engineering*. 2001.

- [89] Jiping Bai, *Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications*, vol. 53, no. 9. 2013.
- [90] V. Antonucci, A. Cusano, M. Giordano, J. Nasser, and L. Nicolais, "Cure-induced residual strain build-up in a thermoset resin," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, no. 4, pp. 592–601, 2006.
- [91] D. H. J. A. Lukaszewicz, K. D. Potter, and J. Eales, "A concept for the in situ consolidation of thermoset matrix prepreg during automated lay-up," *Compos. Part B Eng.*, vol. 45, no. 1, pp. 538–543, 2013.
- [92] R. Askeland, "The Science and Engineering of Materials," *Virginia Tech*.
- [93] N. Saeed, H. Ronagh, and A. Virk, "Composite repair of pipelines, considering the effect of live pressure-analytical and numerical models with respect to ISO/TS 24817 and ASME PCC-2," *Compos. Part B Eng.*, vol. 58, pp. 605–610, 2014.
- [94] M. F. Köpple, S. Lauterbach, and W. Wagner, "Composite repair of through-wall defects in pipework - Analytical and numerical models with respect to ISO/TS 24817," *Compos. Struct.*, vol. 95, pp. 173–178, 2013.
- [95] H. H. Yang, "Kevlar aramid fiber," p. 226, 1993.
- [96] A. Cosham and P. Hopkins, "The pipeline defect assessment manual," *Proc. IPC*, vol. 44, no. 0, pp. 0–17, 2002.
- [97] V. J. Medina Martínez and H. Maury Ramírez, "Desarrollo de un modelo analítico para diseño de mangas metálicas de rehabilitación en tuberías a presión como complemento a la norma ASME PCC2." p. 69, 2018.
- [98] M. Farshad, "Determination of the long-term hydrostatic strength of multilayer pipes," *Polym. Test.*, vol. 24, no. 8, pp. 1041–1048, 2005.
- [99] ISO, "Composite repair for pipework - Qualification and design, installation, testing and inspection - ISO/TS 24817," vol. 2006, p. 76, 2006.